

**ÓZBEKSTAN RESPUBLIKASÍ JOQARÍ HÁM ORTA
ARNAWLÍ BILIM MINISTRILIGI**

**BERDAQ ATÍNDAĞÍ QARAQALPAQ MÁMLEKETLIK
UNIVERSITETI**

Fizika-matematika fakulteti

Fizika kafedrasí

Fizika-matematika fakultetiniń 4-kurs studenti

DILBAR NAWRIZBAEVANÍN

PITKERIW QÁNIGELIK JUMÍSÍ

**Eki tolqınlıq interferenciyalıq eksperimentlerdi optika boyınsha
laboratoriyalıq praktikumda modellestiriw hám ámelge asırıw**

Ilimiy basshısı

hám kafedra baslıǵı

professor **Abdikamalov B.**

Nókis-2019

MAZMUNÍ

KIRISIW	3
I BAP. JAQTÍLÍQTÍN INTERFERENCIYASÍNÍN FIZIKALÍQ TIYKARLARÍ.....	17
1-§. Interferenciya hám difrakciya haqqındaǵı ulıwmalıq eskertiwler.....	17
2-§. Plenkalar menen plastinkalardaǵı eki nurlı interferenciya	20
3-§. Maykelson interferometri	31
4-§. Tolqın frontın bóliw arqalı eki nurlı interferenciyanı júzege keltiriw usılları	33
5-§. I bap boyınsha juwmaqlar hám máseleniń qoyılıwı	38
II BAP. ALÍNGAN SANLÍ HÁM EKSPERIMENTALLÍQ NÁTIYJELER.....	40
6-§. Alınatuǵın sanlı maǵlıwmatlardı aldın ala bahalaw	40
7-§. Qattı denelerdiń sıızıqlı keńeyiw koefficientiniń temperaturadan ǵárezligin ádettegi mikrometrdiń járdeminde ólshew	45
8-§. Jıllılıq keńeyiw koefficientlerin Maykelson interferometriniń járdeminde anıqlaw.....	51
PITKERIW QÁNIGELIK JUMÍSÍ BOYÍNSHA ULÍWMALÍQ JUWMAQLAR.....	54
PAYDALANÍLGAN ÁDEBIYATLARDÍN DIZIMI	55

KIRISIW

Ilmniń tariyxında alımlardıń jaqtılıqtıń tábiyatına bolǵan kóz-qaraslarınan jarqın túrdegi, sonıń menen qarama-qarsılıqlı bolǵan kóz-qaraslardı tabıw qıyın máselelerdiń biri. Optikalıq kóz-qaraslardıń rawajlanıw tariyxı júdá ibratlı tariyx bolıp tabıladı.

Optika mexanikaǵa salıstırǵanda ádewir jas ilim. Sonıń menen birge ol áyyemgi ilimlerdiń qatarına kiredi. Adamzattıń payda bolıwı menen hár kimde qorshaǵan ortalıqlardaǵı zatlar nelikten kórinedi degen soraw payda boldı.

Áyyemgi grek filosoflarında jaqtılıq denelerden shıǵadı degen kóz-qaras orın aldı. Olardıń pikirinshe bir deneler ózinen jaqtılıq shıǵaradı hám sonlıqtan olar kórinedi, al basqa deneler jaqtılıqtıń bir bólimin jutadı, al qalǵan bólimin shaǵılıstıradı hám sonlıqtan kóriw sezimin payda etedi.

Házirgi waqıtları bolsa jaqtılıq haqqında gáp etkende elektromagnit tolqınlarınıń tarqalıwına alıp keletuǵın qubılıstı túsinedi. Bunday jaǵdayda sol elektromagnit tolqınlarınıń kóriw tásinin payda etetuǵınlıǵı yamasa payda etpeytuǵınlıǵı názerde tutilmaydı.

Geometriyalıq optikanıń nızamları haqqındaǵı birinshi maǵlıwmatlar biziń eramızǵa shekemgi 300-400 jılları payda boldı. Jaqtılıqtıń tuwrı sızıq boyınsha tarqalıw nızamın Evklid ashtı dep esaplaydı (biziń eramızǵa shekemgi 300-jıllar). Aristotel (biziń eramızǵa shekemgi 384-322 jıllar) zatlardıń hár qıylı reńleri haqqında oylandı hám reńdi jaqtılıq tarqalatuǵın ortalıqtıń hár qıylı qásiyetleri menen baylanıstırdı. Mısalı Quyash duman arqalı ótkende qızıl, al ashıq kúnde aq bolıp kórinedi. Aristotel boyınsha qızıl reń aq reńniń belgili bir muǵdarı menen qarańǵılıqtıń belgili bir bóleginiń aralasıwınıń nátiyjesinde payda boladı. Jaqtılıqtıń qarańǵılıq penen aralasıwı arasındaqı proporciya reńdi anıqlaydı. Raduganıń reńi usınday jollar menen túsindirildi. Házirgi waqıtları pútkilley durıs emes dep esaplanatuǵın reńniń usınday teoriyası orta ásirlerge shekem durıs dep esaplanıp keldi.

Jaqtılıqtıń shaǵılısıw hám sınıw nızamları da áyyemgi waqıtları baqlandı. Ádewir keyin Rodjer Bekon (1214-1294) ápiwayı linzanıń jumıs islew nızamın ashtı, onıń fokusın anıqladı hám ápiwayı linzanıń aberraciyasınıń bar ekenliginine itibarın qarattı.

Jaqtılıqtıń sınıw nızamın birinshi ret Svellius (1530-1626) tárepinen mınaday túrde ashıldı: "Túsiw múyeshi menen sınıw múyeshiniń kosekanslarınıń qatnası turaqlı shama bolıp tabıladı". Sınıw nızamınıń házirgi waqıtlardaǵı formulirovkası Rene Dekart (1596-1650) tárepinen berildi. Usınday jollar menen geometriyalıq optikanıń tiykarları qalandı.

Nurlardıń jolı haqqındaǵı geometriyalıq kóz-qaraslar alımlardı jaqtılıqtıń korpuskulalıq tábiyatı haqqındaǵı kóz-qaraslarǵa alıp keldi. Nátiyjede jaqtılıq bir tekli ortalıqlarda tuwrı sıızıqlı hám teń ólsheuli qozǵalatuǵın bólekshelerdiń aǵısı túsiniǵı qalıplesti.

XVII ásirdegi optika boyınsha eń iri ashılıwlar Isaak Nyutonga tiyisli (1643-1727). 1666-jılı Nyuton birinshi ret aq jaqtılıqtı (quramalı jaqtılıqtı) reńli qurawshılardı jaydı. Kóriw trubası dóretilgennen keyin predmetlerdiń reńli shegaralarǵa iye bolatuǵınlıǵı belgili boldı. Qarańǵı ójirege diametri $\frac{1}{4}$ dyuym (házirgi waqıtları 1 dyuym = 2,54 sm) bolǵan tesik arqalı Quyash nurın túsirgen. Usı nurdıń jolına prizma qoyǵanda I.Nyuton Quyashtıń reńli súwretin alǵan. Bul reńlik qurawshılardı alım birinshi ret spektr dep atadı. Sonıń menen bir waqıtta alım tárepinen bir birine 180° lıq múyesh penen qoyılǵan eki birdey prizmanıń qarama-qarsı tásirin de baqladı. Bunday prizmalar aq jaqtılıqtı qaytadan tikleydi eken. Nyuton ótkergen tájiriybelerin fundamentallıq tájiriybeler dep atadı hám olardı "ex-perimentum crucis" ataması menen atadı.

Reńlerdiń payda bolıwı haqqında XVII ásirde jańa kóz-qaraslar payda boldı. Ses terbelisleriniń garmonikalıq analizin jaqtılıq qubılıslarına paydalanıw haqqındaǵı usınıslar payda boldı. Nyuton jaqtılıqtıń spektrinde 7 dana bas reńdi ayıra aldı (qızıl, toq sarı, sarı, jasıl, aspan kók, kók, fiolet) hám reńniń hár qıylı

qurawshılarınıń arasındaǵı shegaranı belgiledi¹. Ol aq jaqtılıq ushın 1 ge teń dep alıp hár qıylı reńler ushın kesindiler arasındaǵı sanlıq qatnaslardı anıqladı. Bul sanlıq qatnaslar mınaday túrge iye: $1/2 : 9/16 : 3/5 : 2/3 : 3/4 : 5/6 : 8/9$. Sanlar tonları minorlıq gammanı payda etetuǵın tardıń uzınlıǵına sáykes keledi. Biraq, rańlıq qurawshılardı usınday etip kórsetiw reńlerdiń payda bolıwınıń haqıyqıy sebeplerin túsindire almadı.

Bunnan keyin XIX ásirge kele spektrdiń diapazonı ádewir keńeydi. 1800-jılı Vilyam Gershel (1738-1832) spektrdiń shegarasınıń kózge kórinetuǵın jaqtılıqtıń spektri menen sáykes kelmeytuǵınlıǵın kórsetti hám qızıl nurǵa jaqın nurlardıń jıllılıq qásiyetin ashtı. 1801-jılı Vilyam Vollaiston (1746-1828) fiolet hám onıń menen qońsılas nurlardıń ximiyalıq tásirin ashtı. Biraq, tolqın uzınlıǵı máselesi sheshilmedi (sebebi sol waqıtları "tolqın uzınlıǵı" degen anıq túrdegi xarakteristika ele qalıplespen edi).

Usınıń menen birge XVII ásirde tolqınlıq process sıpatındaǵı jaqtılıq haqqındaǵı kóz-qaraslar qalıplese basladı. Bunday kóz-qaraslar dárhál ayqın hám haqıyqıy formaǵa engen joq. Jaqtılıq haqqında tiykarınan tuwrı sızıqlı hám teń ólshewli qozǵalatuǵın bóleksheler kóz-qarası húkim súrdi.

Franchesko Grimaldi (1618-1663) mınaday jaǵdaydı ańǵardı: ol qarańǵı ójirege kishi tesik arqalı jaqtılıq túsirgende hám usı jaqtılıqtıń aldına tosqınlıq qoyǵanda onıń sayasınıń jaqtılıqtıń tuwrı sızıq boyınsha tarqalǵanına qaraǵanda keńlew boladı eken. Sayanıń eki tárepine de reńli jolaqlar payda bolǵan. Bul jaǵday jaqtılıqtıń tuwrı sızıqlı tarqalıwınan bas tartıwdıń múmkin ekenligi hám jaqtılıqtıń tolqınlıq tábiyatı haqqındaǵı pikirlerdi payda etti. Eki tesik járdeminde tájiriybeler ótkergende Grimaldi jaqtılıq ekinshi jaqtılıq penen qosılıwınıń qarańǵılıqtı payda etetuǵınlıǵın kórdi. Tájiriybelerdiń nátiyjeleri hám olardıń interpretaciyaları Grimaldi tiri waqıtta baspada jarıq kórmedi. Sebebi, alınǵan nátiyjeler sol waqıtları jaqtılıqtıń mexanikanıń nızamların paydalanıw múmkin bólekshelerdiń aǵısı ekenligi haqqında bekkem qalıplesken kóz-qaraslarǵa pútkilley qayshı keletuǵın edi.

¹ Quyashtıń eń baslı reńler haqqında gáp etilip atır. Haqıyqatında Quyashtıń spektrindegı reńlerdiń sanı sheksiz kóp.

Gramaldidiń tájiriybeleri menen derlik bir waqıtta Erazm Bartolidiń (1625-1698) tájiriybeleriniń nátiyjeleri belgili boldı. Ol vrach hám matematik bolǵan, sonıń menen birge astronomiya menen de, fizika menen de shuǵıllanǵan. Onıń optikadaǵı tabısı móldir hák shpatındaǵı jaqtılıqtıń sınırı menen baylanıslı. Ol qos nur sındırıw qubılısın ashtı hám sonıń menen birge kristallooptikanıń tiykarın saldı.

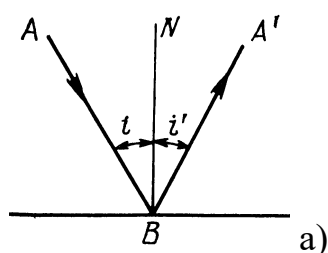
1663-jılı Robert Boyl (1627-1691) juqa hawa qatlamlarındaǵı reńli saqıynalardı baqladı. Saqıynalardıń reńiniń qatlamnıń qalınlıǵınan ǵárezligin birinshi ret I.Nyuton izertledi. Sonlıqtan usınday interferenciyalıq jolaqlardı "Nyuton saqıynaları" dep ataydı.

Barlıq eksperimentallıq faktlerdiń zárúrli bolǵan nátiyjesi jaqtılıqtıń tábiyatına jańasha kóz-qarasarlardı islep shıǵıw zárúrligin payda etti. Sol waqıtları bir birine qarama-qarsı keletuǵın korpuskulyarlıq hám tolqınlıq kóz-qaraslar barlıq waqıtta da básekede boldı.

XVII ásirde jaqtılıqtıń tábiyatı haqqındaǵı kóz-qaraslardıń qalıplesiwinde Xristian Gyuygens (1629-1695) kórnekli orındı iyeledi. Nyutonnıń, Boyldıń, Grimaldidiń tájiriybeleri onı jaqtılıqtıń tolqınlıq tábiyatana alıp keldi. Biraq qalıplesken korpuskulalıq kóz-qaraslardıń fonında onıń tolqınlıq teoriyası kóp alımlar ushın isenimli emes boldı. Nyuton jaqtılıqtıń korpuskulalıq tábiyatınıń tárepdarı bolsa da, óziniń "Optika" (1704-jıl) dep atalatuǵın miynetinde ol jaqtılıqtıń tábiyatınıń korpuskulalıq kóz-qaraslarına da, tolqınlıq kóz-qaraslarına da súyendi. Másele sonnan ibarat, baqlanatuǵın kóp sanlı qubılıslardı (kamera-obskuradaǵı súwrettiń jayılıwı, interferenciya boyınsha islengen tájiriybelerde reńli jolaqlardıń payda bolıwı h.t.b.) jaqtılıqtıń korpuskulalıq tábiyatı haqqındaǵı kóz-qaraslardan kelip shıqqan halda túsindiriw múmkin emes edi.

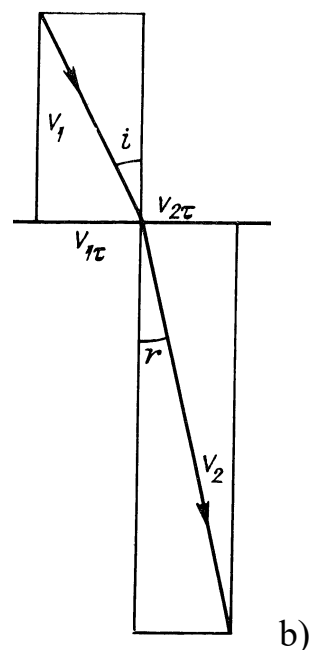
Jaqtılıqtıń sınırı hám shaǵılısıw nızamların eki kóz-qaras boyınsha da túsindiriw múmkin. Biz házir usı proceduranı olar arasındaǵı qarama-qarsılıqtıń bar ekenligin kórsetiw ushın isleymiz. Dáslep sınırı hám shaǵılısıw nızamların Nyuton tárepdarı bolǵan korpuskulalıq kóz-qaraslarda turıp túsinderemiz. Meyli, eki ortalıqtıń arasındaǵı shegaraǵa AB baǵıtında jaqtılıq nurı kelip tússin (1-a

súwret). Nyuton boyınsha jaqtılıqtıń shaǵılısıwı jaqtılıqtıń bóleksheleriniń tegis betten shaǵılısıwın ańǵartadı. Bunday bólekshelerdi serpinli deneler dep esaplaw múmkin. Mexanikanıń nızamlarına sáykes i túsiw múyeshi menen r shaǵılısıw múyeshi teń bolıwı kerek. Jaqtılıqtıń bóleksheleri júdá kishi dep esaplanadı, sonlıqtan tegislikti olarǵa salıstırǵanda absolyut tegislik dep esaplaw múmkin. Sonıń menen birge sındırıwshı bettiń qasında jaqtılıqtıń bólekshesi bazı bir iymek traektoriyaǵa iye boladı dep boljaw kerek.



1-súwret.

Nyuton boyınsha jaqtılıqtıń shaǵılısıwı
hám sınıwı.



Korpuskulalıq teoriyanıń kóz-qarasları boyınsha jaqtılıqtıń sınıwı ortalıqtıń bóleksheleri menen jaqtılıq bóleksheleriniń óz-ara tásirlesiwinin, atap aytqanda jaqtılıq penen ortalıqtıń bóleksheleriniń tartısıwının nátiyjesi dep túsindirildi (1-b súwret). Nyuton boyınsha tartısıw tek sındırıwshı betke perpendikulyar bolǵan tezliktiń qurawshısı ushın orın aladı. Bunnan kelip shıqqan halda jaqtılıqtıń tarqalıwının tangensiallıq qurawshıları ushın $v_{1\tau} = v_{2\tau}$ qatnasın ala alamız.

Bunday jaǵdayda 1-b súwretten kórinip turǵanıday, $v_1 \sin i = v_2 \sin i'$, yaǵnıy

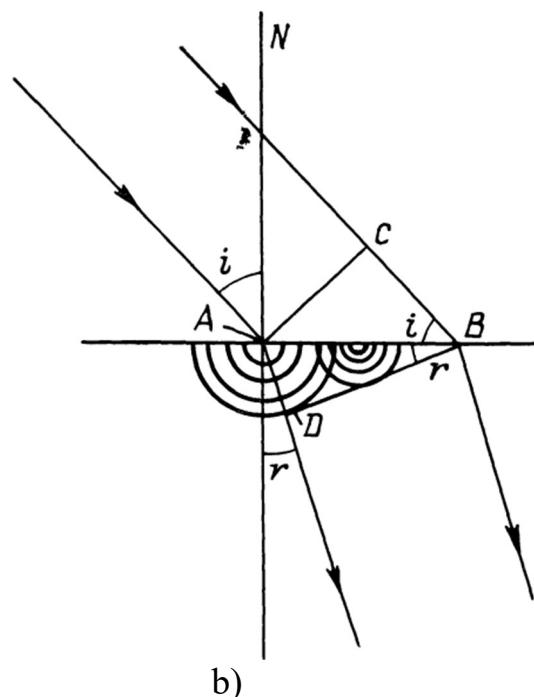
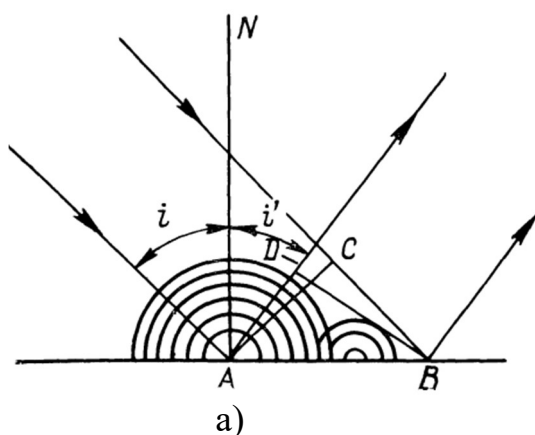
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin r}{\sin i}$$

qatnasına iye bolamız.

Eger ekinshi ortalıq birinshi ortalıqqa salıstırǵanda úlken tıǵızlıqqa iye bolsa, onda tájiriıbeniń tiykarında $I > r$ hám usıǵan sáykes teoriyaǵa sáykes $v_2 > v_1$. Basqa sóz benen aytqanda tıǵızraq ortalıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligi tıǵızlıǵı kem ortalıqtaǵı jaqtılıqtıń tezligine salıstırǵanda úlken boladı degen nátiyjege kelemiz!

Endi jaqtılıqtıń shaǵılısıw nızamı menen sınıw nızamın Gyuygenstiń tolqınlıq kóz-qaraslarında turıp qaraymız (Gyuygens jaqtılıqtıń tolqınlıq tábiyatı kóz-qarasında boldı). Ol óziniń jaqtılıqtıń tábiyatı haqqındaǵı kóz-qarasların óziniń "Jaqtılıq haqqındaǵı traktat" dep atalatuǵın fundamentallıq miynetinde bayanladı. Avtor pútkil álem júdá jeńil hám qozǵalmaytuǵın zat – efir menen toltırılǵan dep tastıyıqlaydı. Efir barlıq denelerge sıńedi hám sonlıqtan barlıq orınlarda bar boladı.

Efirdiń tolqın tárizli qozǵalısw onıń bóleksheleriniń terbelisleri menen baylanıslı – jaqtılıq shıǵarıp turǵan dene efirdiń bólekshelerin terbeliske keltiredi, usınday terbelisler kózge kelip tússe, onda kóriw sezimi payda boladı. Jaqtılıq ses sıyaqlı sferalıq betler menen tarqaladı. Gyuygenstiń kóz-qaraslarında jaqtılıq haqqındaǵı túsinipler sxemalıq xarakterge iye. Ol jaqtılıq tolqınlarınıń dáwiri (yamasa tolqın uzınlıǵı) haqqında hesh nárese aytpadı. Jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵı túsiniǵi teoriyaǵa pútkilley kirgizilgen joq.



2-súwret.

Gyuygens boyınsha jaqtılıqtıń
shaǵılısıwı hám sınıwı.

Reńlerdiń payda bolıwın túsindire almaw Gyuygens teoriyasınıń ázzi tárepleriniń biri bolıp tabıladı. Usı jaǵdayǵa baylanıslı Nyuton tolqınlıq kóz-qaraslardı maqullamadı. Biraq Gyuygenstıń tolqın frontı haqqındaǵı postulattı jaqtılıqtıń shaǵılısıw hám sınıw nızamların durıs hám bir mánisli túsindire aldı (2-súwret). Bul postulattı qısqa túrde bılayınsha aytamız: eger dáslepki fronttıń hár bir noqatın sferalıq tolqınlardıń deregi dep qarasaq hám usı ekinshi tolqınlardı qorshap alatuǵın betti sızsasaq, onda endigi tolqın frontın alamız.

Meyli ayırıp turǵan betke tolqınnıń AC tegis frontı kelip tússin (2-a súwret). Ekinshi tolqınlıq betti dáslep A noqatı ushın dúziw kerek hám terbelisler C noqatınan B noqatına kelip jetemen degen she ekinshi tolqın birinshi ortalıqta AD aralıǵın ótedi. Sonlıqtan $BC = AD$. Tap usınday sızilmanı AB betiniń basqa da noqatları ushın sıziw múmkin. Ekinshi tolqınlardıń betlerine túsirilgen urınba shaǵılısqan tolqınnıń DB frontın súwretleydi. Al usı frontqa perpendikulyar nurlar bolıp tabıladı. CAB hám ADB úsh múyeshleriniń uqsaslıǵınan i hám i' múyeshleriniń birdey ekenligi kelip shıǵadı. Usınday jollar menen shaǵılısıw nızamınıń durıs ekenligi dálillenedi.

Tap usı tallawlar tiykarında sıǵan nurlar ushın da qatnastı alıw múmkin (2-b súwret). Ekinshi ortalıq ushın elementar sferalıq tolqınlıq betlerdi sızamız. Ekinshi ortalıqtıń tıǵızıraq ekenligin esapqa alamız. Eksperimentlerden $r < i$ ekenligi belgili. Sonlıqtan AD sferasınıń radiusı CB kesindisinen kishi boladı. DB kesindisi sıǵan tolqınnıń frontı. 2-b súwretten

$$AB = \frac{BC}{\sin i} = \frac{AD}{\sin r}; BC = v'_1 \tau \text{ ha'm } AD = v'_2 \tau$$

qatnaslarınıń orınlı ekenligi kórinip tur. Bul ańlatpalarda v'_1 hám v'_2 arqalı jaqtılıqtıń birinshi hám ekinshi ortalıqlardaǵı tarqalıw tezlikleri, al τ arqalı jaqtılıqtıń birdey optikalıq uzınlıqlardı ótiw ushın ketken waqıt belgilengen. Demek, joqarıda keltirilgen qatnaslardan

$$\frac{v'_1}{v'_2} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

qatnasına iye bolamız hám bul qatnastan tıǵız ortalıqtaǵı jaqtılıqtıń tezliginiń siyrek ortalıqtaǵı jaqtılıqtıń tezliginen kem ekenligi kelip shıǵadı.

Alınǵan nátiyje $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin r}{\sin i}$ nátiyjesine qarama-qarsı. Al tájiriybeler $i > r$ teńsizliginiń orın alatuǵınlıǵın kórsetedi. Demek $v'_1 > v'_2$ nátiyjesine iye bolamız.

Joqarıda keltirilgen maǵlıwmatlar eki teoriyanıń da geometriyalıq optikanıń nızamların qanaatlandırarlı dárejede túsindire alatuǵınlıǵın kórsetedi. Biraq olar jaqtılıqtıń tezlikleriniń qatnasları ushın qarama-qarsı nátiyelerge alıp keldi. Sol waqıtları teoriyalardıń biriniń paydası ushın máseleni bir mánisli sheshiw múmkin bolmadı (sebebi sınw kórsetkishi birden úlken bolǵan ortalıqlar ushın jaqtılıqtıń tezligi haqqındaǵı maǵlıwmatlar joq edi).

1768-jılı Leonard Eyler (1707-1783) korpuskulalıq teoriyaǵa qarsı shıqtı. Ol tolqınlıq teoriyanıń tiykarında reńlerdiń payda bolıwın túsindirdi. Ol reńlerdi sestin tonları menen salıstırdı hám hár bir reńge terbelislerdiń belgili bir sanların berdi. Eylerdiń korpuskulalıq teoriyaǵa qarsı shıǵıwınıń tiykarǵı sebebi minaday edi: eger Quyash ózinen materiallıq bólekshelerdi shıǵaratuǵın bolǵanda onıń massası kemeygen bolar edi hám sonlıqtan kóp uzamay ol ózin tolıq joǵaltqan bolar edi.

Massa menen energiya arasındǵı házirgi zaman kóz-qarasları nurlanıwdıń sebebinen Quyashtıń massasınıń úzliksiz túrde kemeyetuǵınlıǵın moyınlaydı. Sonlıqtan Quyashtıń massasınıń kemeyiwi jaqtılıqtıń tábiyatınıń qanday ekenligin anıqlawǵa múmkinshilik bermeydi.

Másele sonnan ibarat eki teoriya da óziniń ázzi táreplerine iye boldı: korpuskulalıq teoriya tájiriybelerde baqlanatuǵın difrakciya hám interferenciya qubılısların, al tolqınlıq teoriya bolsa jaqtılıqtıń tuwrı sızıq boyınsha tarqalatuǵınlıǵın túsindire almaydı.

XVIII ásirdiń barısında jaqtılıqtıń teoriyasınıń rawajlanıwı bazı bir waqıtlar dawamında derlik toqtap qaldı. Tolqınlıq teoriya dáwiri XIX ásirdiń basınan baslandı. 1802-jılı Tomas Yung (1773-1829) interferenciyalıq qubılıslardıń tiykarǵı máselelerin qarap shıqtı hám Nyutonniń interferenciyalıq saqıynalarınan payda bolıwın túsindire aldı. Ol birinshiden bolıp jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵı

haqqındağı juwıq mánisti aldı. 1809-jılı Lui Malyus (1775-1812) jaqtılıqtıń polyarizaciyası menen baylanıslı bolǵan tájiriybelerdi ótkerdi hám ótkergen tájiriybelerin tolqınlıq teoriyanıń biykarlanıwı dep esapladı. Haqıyqatında da, jaqtılıqtıń polyarizaciyası qubılısı boylıq tolqın menen úylespeydi. Al sol waqıtları jaqtılıqtı boylıq tolqınlar dep esapladı.

1817-jılı Yung jaqtılıq tolqınlarınıń kóldeneńligi haqqında pikirge keldi. Biraq bil pikirdi sol waqıtları húkim súrgen efir haqqındağı kóz-qaraslar tiykarında túsindiriw dım qıyın edi. Rásında da, eger jaqtılıq kóldeneń tolqınlar bolıp tabılatuǵın bolsa, onda efirge qattı deneniń qásiyetin beriw kerek boladı. Al bul logikalıq jaqtan tábiyiy emes.

1818-jılı Parij Ilimler Akademiyası jaqtılıqtıń difrakciyasın korpuskulalıq teoriya tiykarında túsindiriw boyınsha konkurs járiyaladı. Bul konkurstağı sıylıqtı Ogyusten Frenel (1786-1827) aldı. Ol difrakciya kóz-qarasında turıp jaqtılıqtıń tuwrı sızıq boyınsha tarqalatuǵınlıǵın túsindire aldı. Teoriyanıń bul nátiyjesi rekordlıq boldı. Sebebi sol waqıtlarǵa shekem tolqınlıq teoriya geometriyalıq optikanıń tiykarǵı nızamı bolǵan jaqtılıqtıń tuwrı sızıq boyınsha tarqalatuǵınlıǵın túsindire almaǵan edi. Usınday jollar menen tolqınlıq teoriya jeńiske eristi. Al korpuskulalıq teoriya bolsa ástelik penen ekinshi plangá ketti.

Tolqınlıq teoriyanıń eń aqırǵı tastıyqlanıwın 1850-jıldı esaplaw kerek. Usı waqıtta Jan Fuko (1819-1868) eksperimentlerde jaqtılıqtıń suwdağı tezliginiń hawadağı tezliginen kishi ekenligin kórsetti.

Demek

$$\frac{v_1'}{v_2'} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

qatnası durıs qatnas bolıp shıqtı.

Fizikalıq optikanıń bunnan keyingi rawajlanıwı hár qıylı fizikalıq qubılıslardıń baylanısı sızıǵı boylap keńeydi hám tereńlesti. 1846-jılı Maykl Faradey (1791-1867) optikalıq hám magnitlik qubılıslar arasında baylanıstıń bar ekenligin kórsetti. Ol polyarizaciya tegisliginiń magnit maydanında aylanatuǵınlıǵın taptı. Sonıń menen birge ol toq kúshiniń elektromagnitlik

birliğinin elektrostatiklik birliğine qatnasının jaqtılıqtın tezligine teń ekenligin kórsetti.

1865-jılı iri fizik Djeym Maksvell (1831 -1879) elektromagnit maydanının tarqalıw nızamın keltirip shıǵardı hám elektromagnit tolqınlarını jaqtılıqtın tezligindey tezlik penen tarqalatuǵınlıǵın hám jaqtılıq tolqınlarını elektromagnit tolqınlarını dara jaǵdayı ekenligin kórsetti. Maksvelldiń elektromagnit maydanının teoriyası zatlardıń optikalıq, elektrlik hám magnitlik konstantaları arasındaǵı baylanıstı anıqladı:

$$n = \sqrt{\varepsilon\mu}.$$

Bul ańlatpada n arqalı zattın sınıw kórsetkishi, ε arqalı dielektriklik turaqlı, al μ arqalı magnitlik sińirgishlik belgilengen.

Bul teoriya tiykarında jaqtılıqtın dispersiyası - $n = f(\lambda)$ ǵárezligi ele túsindirilmegen edi. Bul jaǵday jaqtılıqtın zatlar menen tásirlesiwın maydashúydesine shekem qaldırmay izertlewdiń kerek ekenligin kórsetti. Gendriy Lorentc (1853-1928) 1896-jılı elektronlıq teoriyanıń tiykarında zatlardıń dielektriklik turaqlısının tásir etiwshi elektromagnitlik terbelislerdiń jiyiliginen ǵárezli ekenligin dálilledi. Usınıń nátiyjesinde jaqtılıqtın dispersiyası qubılısı túsiniikli boldı.

Elektromagnitlik teoriya tek kóldeneń tolqınlardıń bolatuǵınlıǵın kórsetti. Bul shárt kóp waqıtlarǵa shekem óziniń tastıyqlanıwın tappadı. Aqırında 1888-jılı Genrix Gerc (1857-1894) ótkergen eksperimentlerinde elektromagnit tolqınların taptı hám bunday tolqınlardıń jaqtılıqtın barlıq qásiyetlerine iye ekenligin kórsetti.

Alınǵan nátiyjelerdiń sebebinen efirdiń bar ekenligi óziniń áhmiyetin joǵalttı. Biraq, ayırım máselelerdi sheshiw ushın qozǵalmaytuǵın efir bazı bir esaplaw sisteması sıpatında paydalanıldı. Biraq bul xarakteristika da optikanıń fizikalıq tiykarlarınıń rawajlanıwı menen ástelik penen joǵala basladı. Albert Maykelson tárepinen Jerdiń absolyut tezligin anıqlaw boyınsha ótkerilgen eksperimentler (bul eksperimentlerde qozǵalmaytuǵın efir haqqındaǵı túsiniik esaplaw sisteması sıpatında alınǵan edi) efir haqqındaǵı kóz-qaraslardıń qáte ekenligin kórsetti.

Elektromagnit maydanınıń (onıń dara jaǵdayı bolǵan jaqtılıqtıń) materiyanıń ayrıqsha forması ekenligi túsiniikli boldı hám qanday da bir gipotezalıq efir haqqındaǵı túsiniktiń zárúrligi bolmay qaldı. Nátiyjede jaqtılıqtıń tolqınlıq teoriiyası jańa formada – maydannıń elektromagnit teoriiyası sıpatında jeńiske eristi.

Biraq ámelde baqlanıp júrgen barlıq qubılıslardı jaqtılıqtıń elektromagnit teoriiyası tiykarında túsindiriw múmkinshiligi bolmadı. Bul jaqtılıqtıń jutılıwı menen shıǵarılıwına baylanıslı máseleler bolıp tabıladı. XIX ásirde aqırında jańa eksperimentallıq maǵlıwmatlar alındı hám olar alımlardı jaqtılıq bóleksheleri haqqındaǵı kóz-qaraslarǵa qaytıp keliwge májbúrledi.

1887-jılı Genrix Gerc ultrafiolet nurlardıń shaqmaqlı razryadtı boldıratuǵınlıǵın taptı. 1888-jılı Vilgelm Galvaks (1859-1922) shaqmaqlı razryadtıń payda bolıw sebebinıń elektr zaryadlarınıń payda bolıwı menen baylanıslı ekenligin kórsetti. 1888-jılı iri rus fizigi A.Stoletov (1839-1896) kishi kernewlerde razryadlarındaǵı fotoelektrlik effektke baqladı. Nátiyjede ol fotoeffekt qubılısınıń áhmiyetli nızamların ashtı. Jaqtılıqtıń tásirinde tek teris zaryadlardıń payda bolatuǵınlıǵı kórsetildi. Tájiriybeler jaqtılıqtıń diskret strukturaǵa iye bolatuǵınlıǵın tastıyıqladı. Filipp Lenardtın (1862-1947) izertlewleri fotoeffektin qızıl shegarasınıń bar, elektronlardıń energiyasınıń jaqtılıqtıń intensivliginen ǵárezli emes ekenligin kórsetti. Usı waqıtları P.N.Lebedevtin (1866-1912) jaqtılıqtıń basımın ólshew boyınsha orınlangan orınlaǵan tájiriybeleri jaqtılıqtıń tábiyatı haqqındaǵı kvantlıq kóz-qaraslardıń qalıplesiwinde ullı orındı tuttı. Jaqtılıqtıń basımınıń bar ekenligi Nyutonnıń korpuskulyarlıq teoriiyasınan da kelip shıǵadı. Biraq gazde konvekciyalıq aǵısları menen radiometrik tásirlerde orın alıwına baylanıslı jaqtılıqtıń basımın tájiriybelerde ólshew júdá qıyın eksperimentallıq proceduralardıń qatarına kiredi. P.N.Lebedev bul qıyınshılıqlardı jeńdi hám jaqtılıqtıń basımın ushın sanlı maǵlıwmatlardı ala aldı. Bul tájiriybeler jaqtılıqtıń materiallıq tiykarların jáne bir ret kórsetti.

1900-jılı Maks Plank (1858-1947) diskretlik kóz-qarasınan jaqtılıqtıń nurlanıw teoriiyasın keltirip shıǵardı. Planktıń kvantlar nızamı fizikalıq kóz-qaraslardıń rawajlanıwındaǵı gezekkegi qádem emes, al fizika ilimindegi

revolyuciyalıq ózgeris bolıp tabıladı. Kvantlar teoriiyası zatlardıń atomlıq qurılısın túsiniwge múmkinshilik berdi.

Albert Eynshteyn (1879-1955) jaqtılıqtı kvantlardıń (fotonlardıń) aǵısı dep anıqladı hám hár bir kvantqa $h\nu$ ($h\nu$) energiyası sáykes keledi dep esapladı. Eger kvanttıń energiyası elektrondı zattan julıp alıw ushın jetkiliksiz bolsa, onda fotoeffekt baqlanbaydı. Usınıń saldarınan diskretlik, jaqtılıq aǵısınıń energiyasınıń kvantlangan porciyaları haqqındaǵı kóz-qaraslar jáne joqarı shıńlarǵa shıqtı.

Bunnan keyin jaqtılıqtıń kvantlıq tábiyatın tastıyıqlaw hám jaqtılıqtıń zatlar menen tásirlesiwini izertlew boyınsha fundamentallıq tájiriybeler orındandı. Bunday jumislardıń qatarına zatlardıń anomallıq dispersiyasını izertlew boyınsha ótkerilgen fizik D.S.Rojdestvenskiydiń (1876-1940) jumısların atap ótiw múmkin. Onıń ótkergen arnawlı tájiriybeleri jutıw jolaǵınıń qasındaǵı zatlardıń dispersiyasını ólshewdiń dálligin keskin túrde joqarılattı hám zatlardıń optikalıq konstantaların ólshew máselesin pútkilley jańasha qoydı. S.I.Vavilov (1891 -1952) jaqtılıq aǵısınıń úzlikli ekenligin kórgizbeli túrde kórsete aldı; jaqtılıqtıń kvantlıq tábiyatı menen baylanıslı bolǵan ázzi jaqtılıq aǵıslarınıń fluktuaciyların vizuallıq túrde baqlawǵa múmkinshilik beretuǵın usıldı islep shıqtı. S.I.Vavilov salqın jaqtılıq shıǵarıw – lyuminescenciya boyınsha da kóp sanlı jumıslar tiyisli.

Kombinaciyalıq shashırawdıń spektriniń ashılıwı jaqtılıqtıń kvantlıq teoriiyasınıń durıs ekenligin tastıyıqlaytuǵın áhmiyetli eksperimentlerdiń biri bolıp tabıladı. L.I.Mandelstamniń (1879-1944), G.S.Landsbergtiń (1908-1956) hám onnan ǵárezsiz ótkerilgen hindistan alımı Ramanniń (1901 -1967) eksperimentleri zatlarda shashıraǵan jaqtılıqtıń spektrinde nurlanıwdıń tiykarǵı jiyilikleri menen bir qatarda jaqtılıqtıń tiykarǵı jiyiligi menen molekulalardıń terbelisleriniń menshikli jiyilikleriniń kombinaciyasınan ibarat qosımsha jiyiliklerdiń de bolatuǵınlıǵın kórsetti.

Fizikalıq optika tarawındaǵı bunnan sońǵı jetiskenlikler kvantlıq fizika menen tolqınlıq optikanıń rawajlanıwına baylanıslı júz berdi. Kvantlıq elektronikanıń rawajlanıwı, radiofizikalıq ilimniń qısqa tolqınlı oblastqa ótiwi radiofizika menen optikanıń "birigiwine" hám aqırında jańa optikalıq dúzilisler bolǵan lazerlerdiń

(induciyalangan nurlanwga tiykarlangan sapaliq jaqtan jaña jaqtılıqtın deregi) payda bolıwına alıp keldi. Lazerlerdiń dóretiliwi optikanın rawajlanıwındaǵı iri waqıyalardıń bir bolıp esaplanadı hám bul ilimniń rawajlanıwınıń revolyuciyalıq jolın anıqlap berdi [27-33].

Induciyalangan nurlanıwdı alıwdıń múmkinshiliginiń bar ekenligin birinshi ret 1940-jılı V. A. Fabrikant kórsetti. 1954-jılı Sovetler Soyuzında N.Basov hám A.M.Proxorov hám AQSH ta Gordon, Ceyger hám Tauns tolqın uzılıǵı boyınsha santimetrlik diapazondaǵı úziksiz isleytuǵın kvantlıq generatordı islep shıqtı.

Fizikalıq optikanın jaña baǵdarı bolǵan golografiya rawajlana basladı. 1947-jılı angliyalı fizik Denis Gabor obyektin maydanın jazıp alıwdıń hám qaytadan tiklewdiń jaña usılın usındı. Gabordıń usılınıń ózgesheligi obyektlik tolqınınıń fotoemulsiyada amplitudasın da, fazasın da registraciyalawǵa múmkinshilik beredi. Bul jaǵdaydan golografiyanın fotografiyadan principiallıq jaqtan ózgesheliginiń bar ekenligin kórsetedi (fotografiyada tek amplitudalıq informaciya bar). Golografiyalıq usılda obyekt interferenciyalıq struktura - gologramma túrinde sáwlelendiriledi. Bul usıldı tolqın maydanın jazıwdıń hám qayta tiklewdiń difrakciyalıq usıl dep aytıwǵa boladı.

Sońǵı eki on jıllıq optika tarawında ullı jetiskenlikler menen tolı boldı. Usı dáwirde subpikosekundlıq hám femtosekundlıq uzınlıqtaǵı asa qısqa jaqtılıq impulslerin generaciyalaw imkniyatları jaratıldı. Usınday impulslerdi ~ 1 Dj energiyaǵa shekem kúsheytkende hám jaqtılıqtın tolqın uzınlıǵına barabar maydanǵa fokuslaǵanda $10^{20} \div 10^{21}$ Vt/sm² shamasındaǵı intensivlikti alıw múmkinshiligi tuwıladı.

Asa qısqa impulslerdi talshıqlı-optikalıq tarmaqlarda paydalanıw informaciyanı bir orınnan ekinshi orınǵa jetkerip beriwdiń tezligin 10^{15} bit/s shamasına shekem jetkerdi.

Aktuallıq energiya problemaların sheshiwge qaratılǵan basqarılatuǵın lazerlik termoyadrolıq sintezdi ámelge asırıw baǵdarında jumıslar tabıslı túrde júrgizilip atır.

ótken ásirдің 80-jıllarınıń ortalarınan baslap asa joqarı ajıratıw qábiletligine iye spektroskopiya rawajlana basladı. Bunday spektroskopiya Doppler keńeyiwi orın almaydı hám ol qozǵalısqı jaqtılıqtıń basımı menen kúshli sheklengen atomlar menen molekulalardaǵı ensiz spektrallıq sıızıqlardı registraciyalawǵa tiykarlangan.

Lazer nurınıń járdeminde atomlardı oǵada tómegen bolǵan 20 nK temperaturaǵa shekem salqınlatıw máselesi sheshildi.

Astronomiyalıq hám astrofizikalıq izertlewlerdi orınlaw ushın aynasınıń diametri 8-10 m bolǵan teleskoplar soǵıldı hám paydalanıwǵa berildi. Teleskoplardı birgelikte fokuslaǵanda teleskoplar sistemasınıń múyeshlik ajırata alıwshılıq qábiletligi aynasınıń diametri 200 m bolǵan teleskoptıń ajırata alıw uqıplıǵın beredi.

Gravitaciyalıq tolqınlardı registraciyalaw ushın iyinleriniń uzınlıǵı 4 km bolǵan Maykelson interferometri bolǵan oǵada úlken gravitaciyalıq antennalar soǵıldı hám iske túsirildi. Nátiyjede 2016-jılı gravitaciyalıq tolqınlar registraciyalandı [27-35].

I BAP. JAQTÍLÍQTÍN INTERFERENCIYASÍNÍN FIZIKALÍQ TIYKARLARÍ

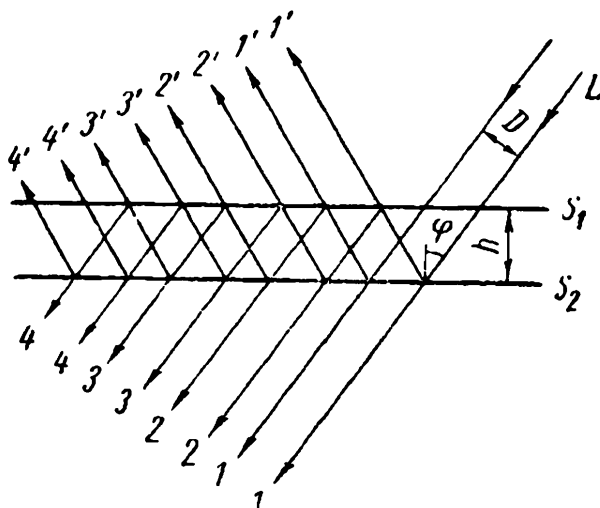
1-§. Interferenciya hám difrakciya haqqındaǵı ulıwmalıq eskertiwler

Interferenciya qubılısı tolqınlardı qosıw bolıp tabıladı hám usınıń saldarınan keńislikte intensivliktiń tarqalıwınıń ornıqlı súwreti payda boladı. Jaqtılıqtıń qosındı intensivligi qosılıwshı tolqınlardıń intensivlikleriniń qosındısına teń bolmaydı. Interferenciya qubılısı bir biri menen kogerentli bolǵan, yaǵnıy terbelisler arasındaǵı fazalıq ayırma turaqlı bolǵan jaqtılıq derekлерinen shıqqan jaqtılıqlardı qosqanday baqlanadı.

Elementar derekler tárepinen statistikalıq túrde shıǵarılǵan spontan nurlanıw tiykarında turatuǵın jaqtılıqtıń tábiyiy derekleri óz-ara kogerentli emes. Sonlıqtan hár qıylı tábiyiy dereklerden shıqqan jaqtılıqlardı qosıw jolı menen interferenciyalıq súwretti baqlaw múmkin emes. Kogerentli jaqtılıq derekleri yamasa dáliregi kogerent jaqtılıq nurları jaqtılıq dástesin (jaqtılıq tolqın) ekige yamasa onnan da kóp sandaǵı dástege (hátte sheksizlikke shekem) ayırıw jolı menen aladı. Sol dásteler keńislikte hár qıylı uzınlıqtaǵı jollardı ótkennen keyin qosılıp intensivliktiń tarqalıwınıń anaw yamasa mınaw súwretin beredi. Alınǵan súwret kópshilik jaǵdaylarda gezeklesetuǵın maksimumlardan hám minimumlardan turadı.

Interferenciyalanıwshı nurlardı alıw hár qıylı jollar menen ámelge asırıladı. Mısalı, jaqtılıq dástesiniń barlıǵın bir qatar jaqtılıq dástelerine bóliw múmkin. Bul operaciyaда alınatuǵın parciallıq tolqınlardıń amplitudaları túsiwshı tolqınnıń amplitudasınıń bir bólegin quraydı.

Bunday jaǵdayda interferenciyalanıwshı nurlar túsiwshı elektromagnit tolqınınıń amplitudasın parciallıq tolqınlardıń amplitudalarına bóliw jolı menen alındı dep aytadı.



1-súwret.

1-súwrette elektromagnit (jaqtılıq) tolqınıń amplitudasın aynalarda shaǵılıstırıw arqalı bóliw jolı menen interferenciyalanıwshı nurlardı alıwǵa mısál keltirilgen: tegis elektromagnit tolqın L bir birinen h qashıqlıǵında jaylasqan jaqtılıqtıń bir bólegin ótkeretuǵın S_1 hám S_2 aynalarına kelip túsedi. Bul aynalardıń úlken shaǵılıstırıw koefficientlerine baylanıslı tolqınlardıń kóp sanlı kogerentli dásteleri payda boladı: olar $1, 2, 3, 4, \dots$ hám $1', 2', 3', 4', \dots$ arqalı belgilengen. Qońsılas nurlar arasında (mısalı, 1 menen 2) júrisler ayırması γ bılayınsha esaplanadı:

$$\gamma = 2h \cos \varphi. \quad (1)$$

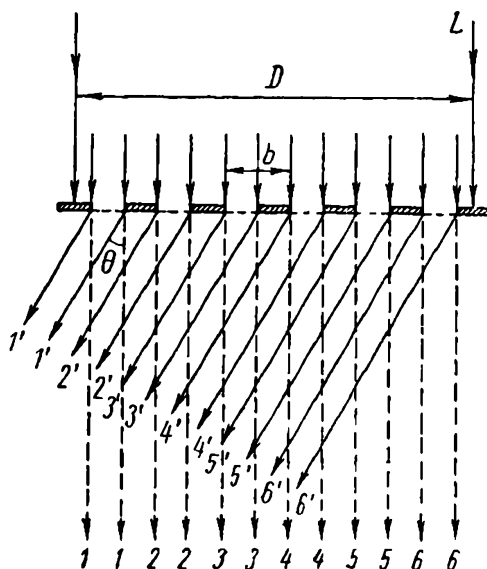
Eger ϑ' arqalı amplituda ushın aynalardıń ótkeriw koefficientin, ρ arqalı amplituda ushın aynalardıń shaǵılıstırıw koefficientin, E_0 arqalı kelip túsken tolqınıń amplitudasın belgilesek, onda $1, 2, 3, 4, \dots$ dástelerindegi tolqınlardıń amplitudası

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \vartheta'^2 E_0, \\ a_2 &= \vartheta'^2 \rho^2 E_0, \\ a_3 &= \vartheta'^2 \rho^4 E_0, \\ &\dots \\ a_N &= \vartheta'^2 \rho^{2(N-1)} E_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

izbe-izligin payda etedi. Bul ańlatpadan hár bir kelesi dásteniń amplitudasınıń izbe-izlik penen kishireyetuǵınlıǵı kórinip tur. Demek, S_1 hám S_2 aynaları menen sheklengen plastinkaǵa kelip túsetuǵın L dásteniń amplitudası $1, 2, 3, 4, \dots$ hám $1'$,

2', 3', 4', ... dásteleri arasında bólinedi eken.

Usınday jollar menen payda bolǵan dástelerdi linzanıń járdeminde fokusta jıynaw múmkin. Sol fokusta interferenciya baqlanadı.



2-súwret.

Elektromagnit tolqınlarınń interferenciyanıwshı dástelerin alıwdıń ekinshi usılın qaraymız (2-súwret). Bul jaǵdayda D keńligine iye L tolqın frontı bir birinen birdey qashıqlıqta jaylasqan sańlaqları bar ekranda (difrakciyalıq reshetskada) ensiz $11, 22, 33, 44, \dots$ frontlarına ajıraladı. Nurdıń tiykarǵı bólegi L túsiwshi nurdıń baǵıtında júredi. Biraq, elektromagnitlik nurlanıwdıń bir bólimi onıń tolqınlıq tábiyatına sáykes θ baǵıtına burıladı. Usı θ baǵıtı ushın mınaday shárt

$$b \sin \theta = k\lambda \quad (3)$$

orınlanadı. Bul ańlatpada b arqalı pánjereniń turaqlısı, λ arkalı tolqın uzınlıǵı, al k arqalı pútin san belgilengen.

Bul jaǵdayda interferenciyanıwshı nurlardıń payda bolıwı jaqtılıq tolqınıń frontınıń ayırım uchastkalarǵa bóliniwiniń saldarı bolıp tabıladı. Biraq tolqın frontınıń bul bóliniwi de jaqtılıq tolqınıń amplitudasınıń bóliniwi menen júzege keledi. Bólingen tolqınlar barlıq baǵıtlarda tarqalıp, bir orınlarda qosıladı hám kúsheyedi, al basqa orınlarda bir birin hásiretedi.

Jaqtılıq tolqınıń tarqalıwındaǵı ulıwma jaǵdayda tolqın frontınıń kishi bólimin interferenciılanıwshı tolqınlardıń deregi dep qaraw múmkin. *Usı kóp sanlı*

ayırım uchastkalardan shıǵatuǵın tolqınlardıń interferenciyasın difrakciya dep ataydı. Eger jaqtılıq tolqınıń frontı $D \gg \lambda$ keńligine iye bolsa, onda difrakciyanıń saldarınan alınatuǵın jaqtılıq tolqını (eger onı baqlaytuǵın qashıqlıq r úlken bolmasa, yaǵnıy $D/r \gg \lambda/D$ teńsizligi orınlanatuǵın jaǵdaylarda) dáslepki jaqtılıq tolqınlarınan azmaz ayırmaǵa iye boladı hám difrakciyalıq qubılıslar derlik kórinbeydi. Sonlıqtan, eger joqarıda keltirilgen shártler boyınsha jaqtılıq tolqınları qosılatuǵın bolsa, onda *taza túrindegi interferenciya* haqqında gáp etiledi.

Mısalı, 1-súwrette kórsetilgen jaǵday ushın júdá úlken bolǵan S_1 hám S_2 aynaların hám usıǵan sáykes keń bolǵan L dástesin alıw múmkin. Usınıń saldarınan $\lambda \ll D$ teńsizligi orınlanadı, yaǵnıy sheksiz keń interferenciyalanatuǵın dásteler alınadı. Bunday jaǵdayda difrakciya qubılısın esapqa almawǵa boladı. Eger $\lambda \ll D$ shárti orınlanbaytuǵın bolsa, onda difrakciya qubılısın esapqa almay ketiwge bolmaydı.

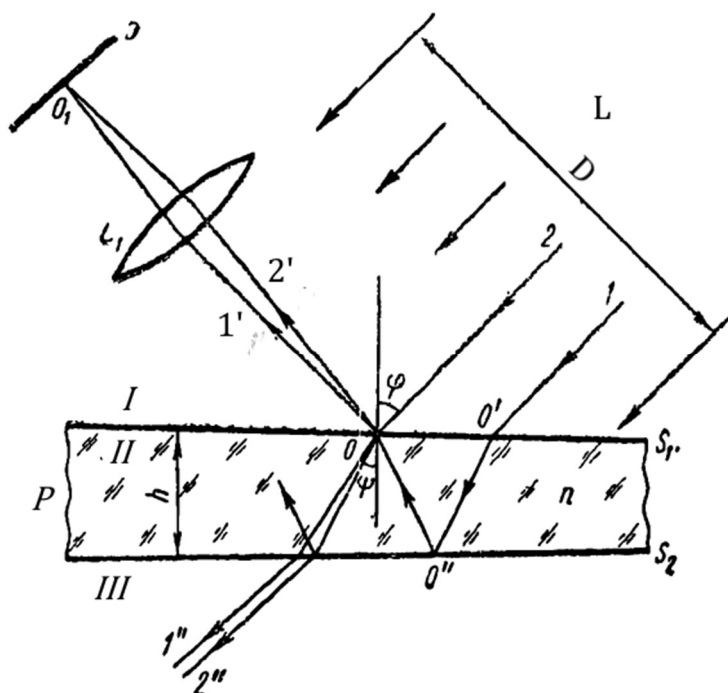
Haqıyqatında "taza túrdegi interferenciya" da difrakciyalıq qubılıslardı tolıq esapqa almawǵa bolmaydı. Kerisinshe, joqarıda aytılıp ótilgenindey, difrakciyalıq qubılıslar óziniń mánisi boyınsha dáslepki tolqınıń hár bir elementar bóliminen tarqalatuǵın elementar tolqınlardıń interferenciyası bolıp tabıladı (biz bul jaǵdaydı Gyuygens-Frenel principi dep ataymız).

Biz tómende eki nurdıń interferenciyası qubılısın qarap shıǵamız (plenka menen plastinkalardaǵı hám optikalıq sistemalardaǵı eki tolqınlı interferenciya, ámelde áhmiyetli orındı iyeleytuǵın eki nurlı interferometrler). Kóp sanlı nurlardıń interferenciyasın qaraǵanda interferenciya menen difrakciya qubılısların bir birinen ayırıwǵa bolmay qaladı [1-14,16].

2-§. Plenkalar menen plastinkalardaǵı eki nurlı interferenciya

Móldir plenklar menen plastinkalardıń járdeminde júzege keletuǵın interferenciya qubılısın qaraǵanda bir birinen kúshli ayrılatuǵın eki jaǵdaydıń orın alıwı múmkin. Birinshi jaǵdayda plastinkanı shekleytuǵın betler (plastinkanıń eki tárepindegi betler) bir birine parallel emes hám olar arasında kishkene múyesh bar. Bunday plastnikalardı sına tárizli plastinkalar dep ataydı.

Ekinshi jaǵdayda plastinkanıń betleri bir birine parallel. Bunday jaǵdayda tegis-parallel plastinkalardaǵı jaqtılıqtıń interferenciyası haqqında gáp etedi.



3-súwret. Sına tárizli plastinkadaǵı interferenciya.

1. **Sına tárizli plastinkalardaǵı interferenciya.** Amplitudanı bóliw arqalı payda etiletuǵın eki nurlı interferenciyanıń eń áhmiyetli túrleriniń biri móldir plenklar menen plastinkalardaǵı shaǵılısqan yamasa olar arqalı ótken nurlardıń interferenciyası bolıp tabıladı. Interferenciyalanıwshı nurlardıń payda bolıw sxeması 3-súwrette keltirilgen.

Kese-kesimi D bolǵan L parallel nurlardıń dástesi S_1 hám S_2 betleri menen sheklengen P plastinkasına kelip túsedı. Ulıwma jaǵdayda plastinka ózgermeli h qalıńlıǵına iye. Nurlardıń túsiw múyeshi φ , al sınıw múyeshi ψ arqalı belgilengen. Plastinkanıń beti arqalı júrgende onıń qalıńlıǵınıń ózgerisi júdá kishi hám onıń shaması túsiwshı tolqınıń uzunlıǵı menen salıstırarlıqtay bolsın. Basqa sóz benen aytqanda plastinkanıń beti boyınsha júzlegen, mınlaǵan tolqın uzunlıǵına teń aralıqqa jılısqanda, plastinkanıń qalıńlıǵı tek bir tolqın uzunlıǵına ózgeretuǵın bolıwı kerek. Bunday jaǵdayda 1 hám 2 nurları O hám O' noqatlarında sınıǵannan hám O menen O'' noqatlarında shaǵılısqannan keyin interferenciyalanıwshı nurlardıń jubın payda etedi: $1'$ menen $2'$ - shaǵılısqan jaqtılıqta hám $1''$ menen $2''$ -

ótken jaqtılıqta. Eki móldır ortalıq arasındaǵı shegaradaǵı shaǵılısıw koefficientleriniń shaması úlken bolmaǵanlıqtan (shama menen 5 %) 1' jáne 2' nurlarınıń intensivlikleri derlik birdey boladı, al 1'' jáne 2'' nurları bolsa intensivlikleri boyınsha kúshli ayrıladı.

Eger qanday da bir dúzilistiń járdeminde (kóz, L_1 linzası hám basqa da dúzilis) S_1 hám S_2 betleriniń noqatlarınan shıqqan nurlardı, mısalı E ekranında jıynasaq S_2 (yamasa usı betke kózdi úyretsek), onda bul nurlardıń maksimumlar menen minimumlardı payda etip bir biri menen interferenciyalanǵanlıǵına kóz jetkeriwge boladı. Quramalı emes esaplawlardıń nátiyjesinde 1' hám 2', jáne 1'' hám 2'' nurları arasındaǵı júrisler ayırmasınıń

$$\gamma = 2nh \cos \psi \quad (4)$$

shamasına teń bolatuǵınlıǵına iye bolamız. Bul ańlatpada n arqalı qorshaǵan ortalıqqa salıstırǵandaǵı P plastinka soǵılǵan zattıń sınıw kórsetkishi, ψ arqalı sınıw múyeshi belgilengen. Biraq, plastinkanıń joqarǵı betinen shaǵılısqanda 1' hám 2' nurları arasındaǵı $\lambda/2$ shamasına teń júrisler ayırmasına baylanıslı fazanıń qosımsha awısıwınıń orın alatuǵınlıǵın esapqa alıw zárúr. Yaǵnıy shaǵılısqan nurlar ushın

$$\gamma_r = 2nh \cos \psi + \lambda/2 \quad (5)$$

ańlatpasına, al ótken nur ushın

$$\gamma_d = 2nh \cos \psi \quad (6)$$

ańlatpasına iye bolamız.

Ótken jaqtılıqta intensivlikleri úlken shamaǵa ayrılatuǵın nurlar interferenciyaǵa ushıraydı. Sonlıqtan interferenciyalıq súwrettegi maksimumlar menen minimumlar arasındaǵı ayırmanı baqlaw qıyın hám sonlıqtan ámeliy jaqtan kızıǵıwshılıqtı payda etpeydi. Al shaǵılısqan jaqtılıq nurlarında kogerentlik shárti buzılmaǵan jaǵdaylarda jaqtılıqtıń intensivliginiń maksimumları menen minimumlarınan turatuǵın interferenciyalıq súwret anıq kórinedi. Interferenciya jolaqlarındaǵı intensivliktiń tarqalıwı

$$I = 2I_0 \left\{ 1 + \frac{\sin\left(\frac{l\delta\omega}{c}\right)}{\frac{l\delta\omega}{c}} \cos\left(\frac{\omega_{mn}l}{c}\right) \right\}$$

añlatpasınıń járdeminde esaplanadı. Bul añlatpada I_0 arqalı bir derektiń nurları tárepinen alıp júriletuǵın tolıq quwatlıq belgilengen. Eger usı formulada jiyiliklerden tolqın uzınlıqlarına ótsek, onda joqarıda keltirilgen formulanı bılayınsha kóshirip jazıwǵa boladı (mn indeksleri jazılmaǵan):

$$I = 2I_0 \left\{ 1 + \frac{\sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda} \frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)}{\frac{2\pi l}{\lambda} \frac{\delta\lambda}{\lambda}} \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right) \right\} \quad (7)$$

Eger $\frac{\delta\lambda}{\lambda} \ll 1$ teńsizligi orınlı bolsa (yaǵnıy nurlanıw jetkilikli dárejede monoxromat bolatuǵın bolsa), onda $\frac{\sin\beta}{\beta}$ qatnası ($\beta = \frac{2\pi l}{\lambda} \frac{\delta\lambda}{\lambda}$ belgilewi qabıl etildi) hátte salıstırmaı úlken júrisler ayırmasında da 1 ge jaqın bolıp qaladı.

Eger

$$\frac{2\pi l}{\lambda} \frac{\delta\lambda}{\lambda} \ll \pi \quad (8)$$

hám usıǵan sáykes

$$\frac{2\delta\lambda}{\lambda} \leq \frac{\lambda}{l}$$

teńsizligi orınlanatuǵın bolsa, onda

$$\frac{\sin\beta}{\beta} \approx 1$$

teńligine iye bolamız. Bunday shártlerde (7)-formula ápiwayılasadı:

$$I = 2I_0 \left\{ 1 + \cos\frac{2\pi l}{\lambda} \right\} \quad (9)$$

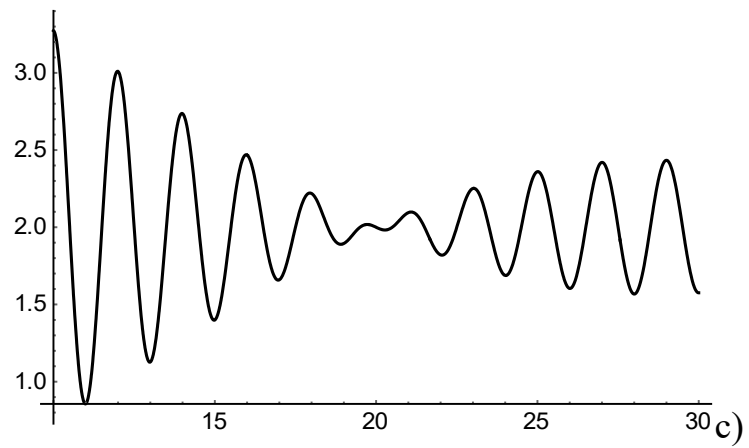
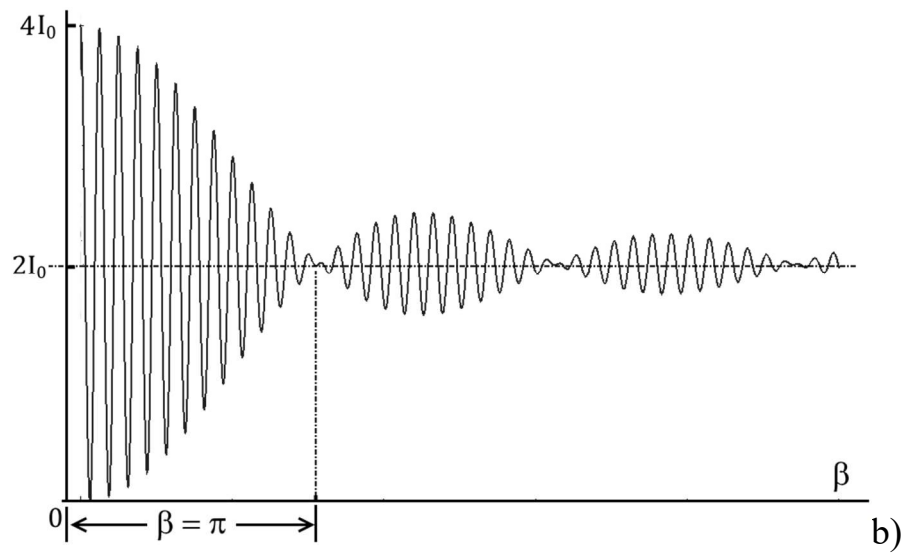
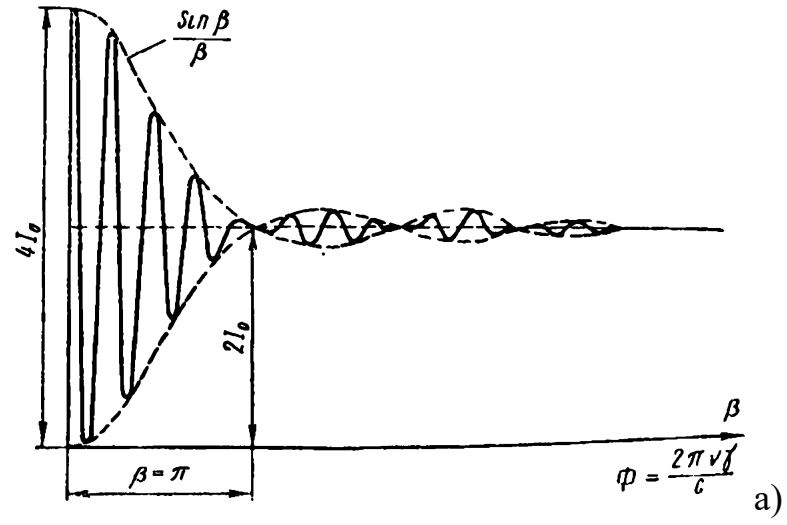
yamasa

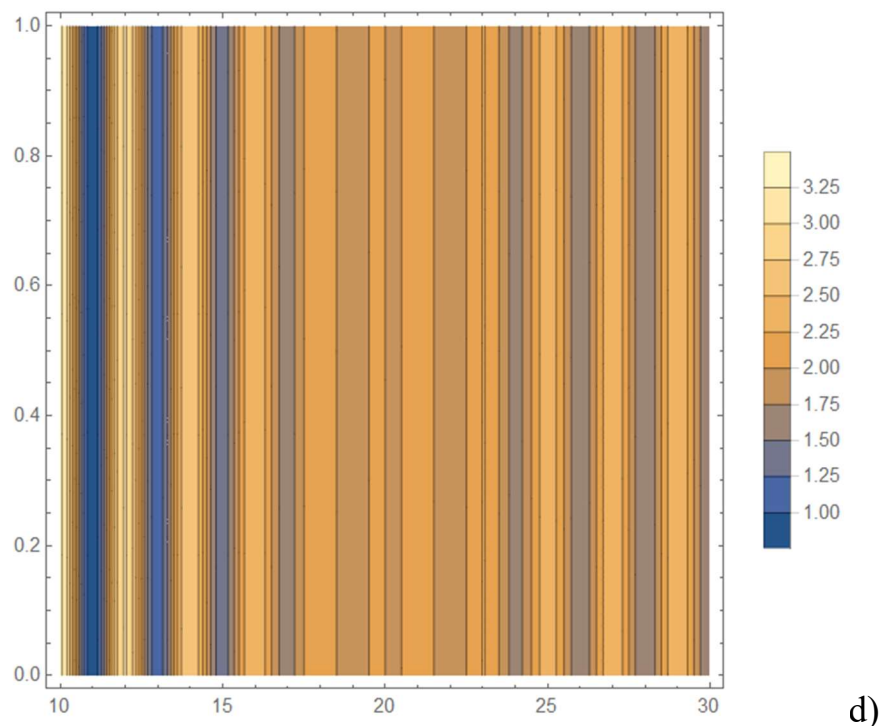
$$I = 4 I_0 \cos^2 \frac{\pi l}{\lambda} \quad (10)$$

añlatpasına iye bolamız. Bul añlatpada I_0 bir intenferenciyanıwshı dástedegi intensivlik belgilengen. l shamasın júrisler ayırması γ ǵa teńlestiriw múmkin. Bunday jaǵdayda

$$I = 4 I_0 \cos^2 \frac{\pi \gamma}{\lambda} \quad (11)$$

formulasına iye bolamız.





4-súwret. (7)-formula boyınsha esaplawlardıń nátiyjesi:

a) – [1] dereginen alıńan.

b) – Mathematica universallıq algebra sistemasınıń 11.3 versiyasınıń járdeminde ótkerilgen esaplawlardıń nátiyjesinde alıńan grafik (ulıwma jaǵday).

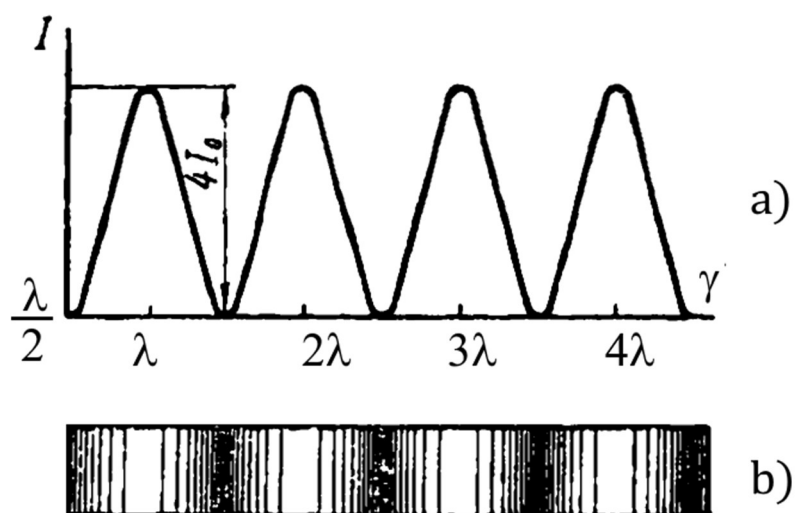
c) – $\pi l/\lambda$ shaması ushın $10 \div 30$ intervalı ushın alıńan grafik.

d) - $\pi l/\lambda$ shaması ushın $10 \div 30$ intervalı ushın alıńan interferenciyalıq jolaqlar.

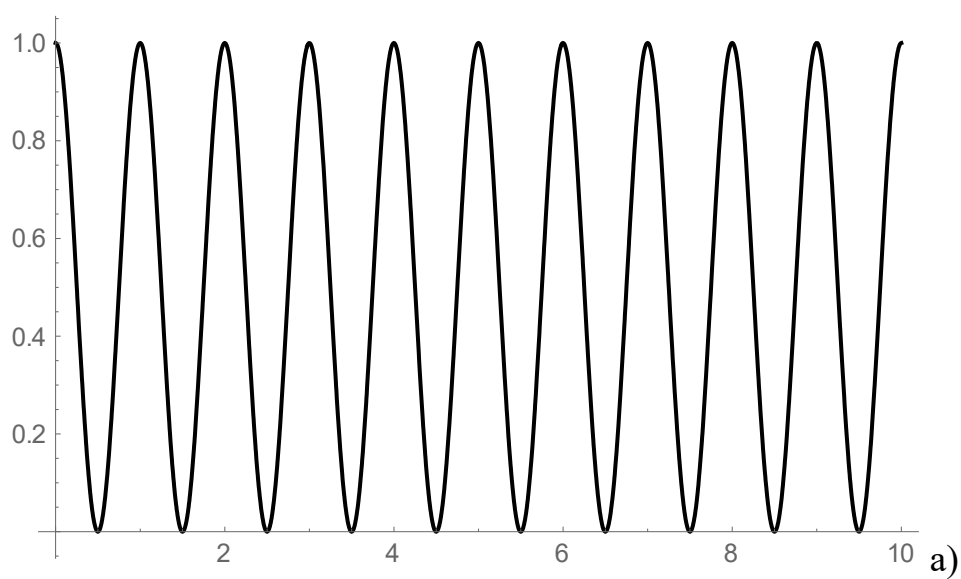
c) hám d) súwretlerdi salıstırıw kerek.

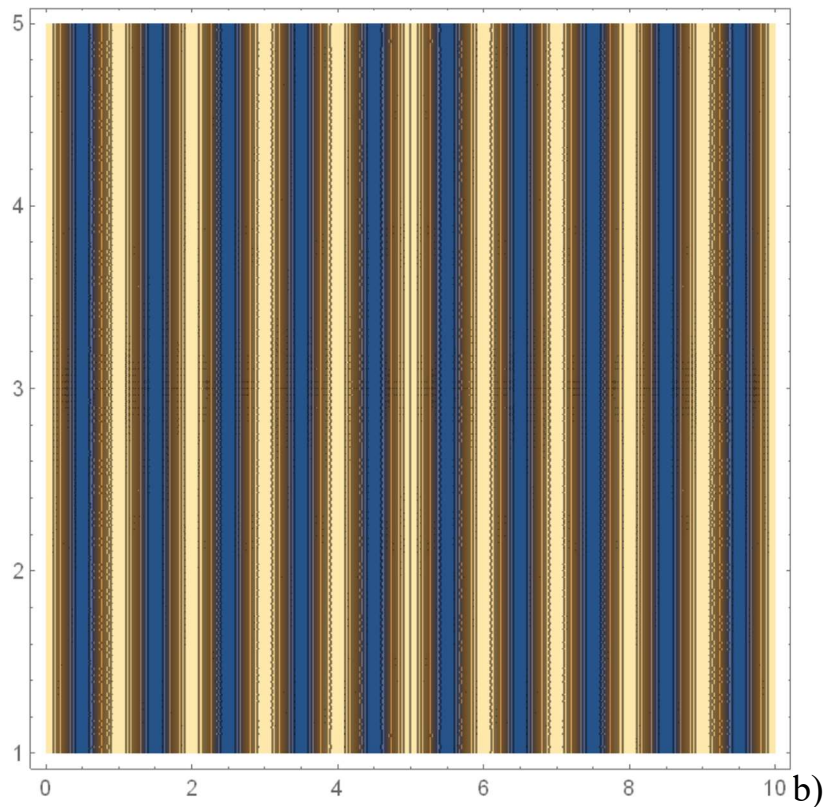
4-súwrette (7)-formula boyınsha táriyiplenetuǵın intensivliktiń tarqalıwı keltirilgen.

Al 5-a súwrette keltirilgen grafik (10)-formula boyınsha esaplawdıń saldarınan alıńan grafik berilgen. 6-b súwrette bolsa plastinkanıń beti boyınsha qashıqlıq ózgergende júrisler ayırması sızıqlı túrde ózgeretuǵın jaǵday ushın shashıraǵan tolqınlarda payda bolatuǵın interferenciyalıq jolaqlardıń túri keltirilgen. $\Phi = (2\pi v/c)\gamma$ yamasa $\Phi = (2\pi/\lambda)\gamma$.

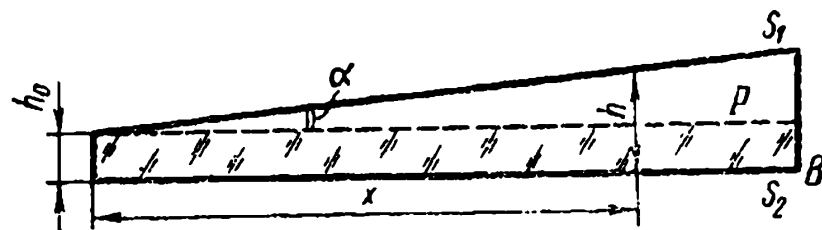


5-súwret. (10)-formula boyınsha ótkerilgen esaplawlardıń nátiyjesi (a súwret) hám shaǵılısqan nurlar ushın interferenciyalıq jolaqlardıń kórinisi (b súwret).





6-súwret. Mathematica 11.3 sistemasınıń járdeminde (10)-formula boyınsha ótkerilgen esaplawlardıń nátiyjesi (a súwret) hám shaǵılısqan nurlar ushın interferenciyalıq jolaqlardıń kórinisi (b súwret).



7-súwret. Sına tárizli plastinka.

Meyli, p plastinkası bazı bir α múyeshine iye sına túrine iye bolsın (7-súwret). Sınanıń juqa shetinen ıqtıyarlı x qashıqlıǵındaǵı plastinkanıń qalınlıǵı h tı (a nıń kishi ekenligin esapqa alǵan halda) bılayınsha esaplaymız:

$$h = h_0 + \alpha x. \quad (12)$$

SHashıraǵan tolqınlar ushın júrisler ayırması (2)-formulanıń járdeminde anıqlanadı.

Endi $\psi = 0$ dep boljaymız. Bunday jaǵdayda

$$\gamma_r = 2nh + \frac{\lambda}{2} \quad (13)$$

ańlatpasına iye bolamız. Usınday jaǵday ushın interferenciyanıń jolaqları arasındaǵı qashıqlıqtı esaplaymız.

(11)-formulaǵa sáykes interferenciyanıń maksimumı

$$2nh + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (14)$$

shárti orınlangan jaǵdayda alınadı. Bir maksimumnan ekinshi maksimumǵa ótkende h hám k shamaları ózgeredi, al n menen λ shamaları turaqlı qaladı. (14)-ańlatpanı h hám k boyınsha differenciallaymız:

$$2n\delta h = \lambda\delta k.$$

(12)-ańlatpadan δh ushın

$$\delta h = \alpha\delta x$$

qatnasın alamız.

δh shamasınıń tabılǵan mánisin onıń aldındaǵı ańlatpaǵa qoyıp hám $\delta k = 1$ dep boljap (sebebi, biz qońsılas jolaqlar arasındaǵı qashıqlıqtı izlep atırmız, al sonday qashıqlıqta k shaması 1 ge ózgeredi

$$\delta x = \frac{\lambda}{2n\alpha} \quad (15)$$

ańlatpasın alamız. Bul ańlatpada δx arqalı interferenciyanıń qońsılas jolaqları arasındaǵı qashıqlıq belgilengen.

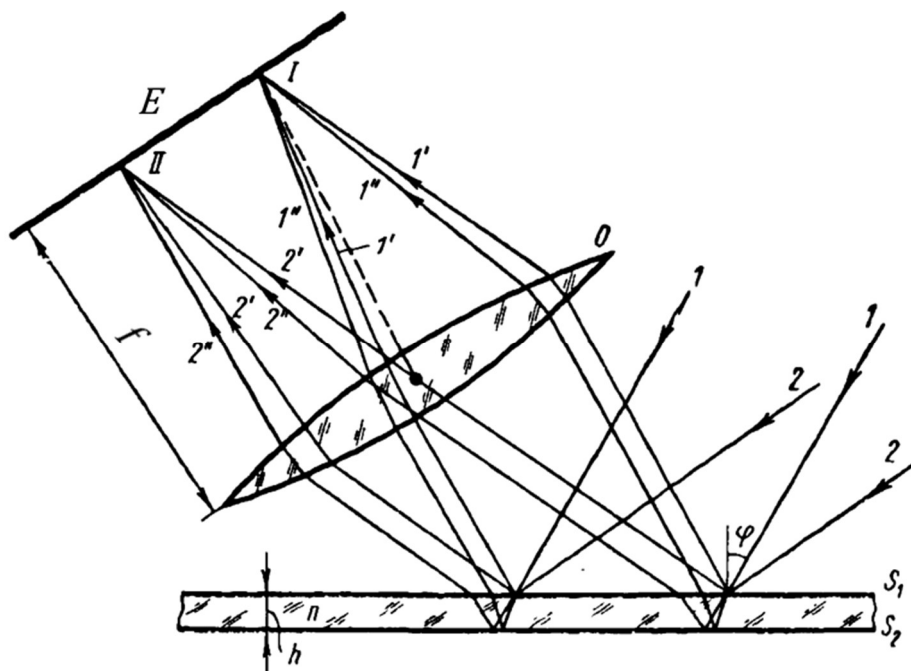
Bul formulada α múyeshiniń kishireyiwi menen jolaqlar arasındaǵı qashıqlıqtıń tez ósetuǵınlıǵın kóremiz. Sonıń menen birge jolaqlardıń arasındaǵı qashıqlıq plastinkanıń qalınlıǵınan ǵárezli emes eken. Eger $\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ sm (6000 Å), $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ rad, $n = 1,5$ bolǵan jaǵdayda $\delta x = 1$ sm. Bul jaǵdaydan interferenciyanıń járdeminde oǵada kishi múyeshlerdi ańsat ólshewge bolatuǵınlıǵı kórinip tur.

Joqarıda talqılangan jaǵdayda interferenciyalıq jolaqlardıń kópligi bet boyınsha qozǵalǵanda plastinkanıń yamasa plenkanıń qalınlıǵınıń ózgeriwiniń saldarınan alınadı. Sonlıqtan alınǵan interferenciyalıq jolaqlardı *teńdey qalınlıqlar interferenciyası* dep ataydı. Usınday interferenciya plenkanıń yamasa plastinkanıń qalınlıǵı ózgermeytuǵın jaǵdaylarda da, biraq onıń sınıw kórsetkishi n ózgeretuǵın jaǵdaylarda da alınadı. Ulıwma n menen h shamalarınıń bir waqıtta ózgeriwi

múmkín.

Teńdey qalıńlıqlar interferenciyası suwdıń betinde qalqıp júretuǵın maydıń juqa plenkalarında, suwdıń betinde otırǵan suw tamshısınıń juqa qatlamında, metallardıń jıltır betindegi okisleniwdiń saldarınan payda bolǵan juqa plenkada hám basqa da orınlarda baqlanadı.

2. Tegis parallel plastinkadaǵı interferenciya. Bunday plastinkalarda $\alpha = 0$ hám sonlıqtan $h = const$. Bunday jaǵdayda (3-súwrette kórsetilgen) plastinkanı (yamasa plenkanı) parallel nurlar menen jaqtılandırǵanda bettiń barlıǵı jaqtılıqtıń birdey intensivligine iye boladı hám eki nurdıń qosılıwınan ǵárezsiz hár qıylı intensivliklerge iye bolǵan jolaqlar baqlanbaydı. Biraq bul jaǵdayda da interferenciyalıq jolaqlardı kóriw múmkín. Tek ǵana plastinkanı parallel nurlar menen emes, al tarqalıwshı nurlar (yaǵnıy barlıq tarqalıw baǵıtlarına iye sheksiz sandaǵı tegis tolqınlardıń qosındısı) menen jaqtılandırıw kerek. Alınǵan interferenciyalıq súwretti baqlaw ushın O linzası kerek boladı (8-súwret).



8-súwret. Tegis parallel plastinkadaǵı tolqın frontı sferalıq bolǵan jaqtılıq tolqınıń interferenciyası.

S_1 hám S_2 betlerinde 11 hám 22 parallel nurlar (sonıń menen birge basqa qálegen nurlar) interferenciyalanatuǵın $1'1'$ hám $1''1''$, $2'2'$ hám $2''2''$ nurlarınıń jupların payda etedi. Olar O linzası arqalı ótip fokal tegislik E de I hám II noqatları

túrinde súwret payda etedi. Bul jaǵdayda $h = \text{const}$ bolǵanlıqtan hár qıylı interferenciyalıq jolaqlar φ túsiw múyeshiniń ózgerisiniń saldarınan alınadı. Interferenciya jolaqlarınıń intensivlikleri bul jaǵdayda da (7)- hám (10)- ańlatpalardıń járdeminde alınadı (eger, interferenciyanıwshı nurlardıń hár birinde intensivlik birdey dep esaplanatuǵın bolsa). Usınıń menen birge hár qıylı tártiptegi interferenciyanıń jolaqlarınıń intensivlikleriniń túsiw múyeshi φ diń ózgerisi menen shaǵılastırıw koefficientiniń ózgeriwiniń saldarınan ózgeretuǵınlıǵın da esapqa alıw kerek boladı. Interferenciyanıwshı nurlardıń júrisler ayırması bkl jaǵdayda da (5)-formulanıń járdeminde h tıń turaqlı, al φ diń ózgeretuǵınlıǵın esapqa alǵan halda anıqlanadı.

Minimum shártin jazamız:

$$2nh \cos \varphi + \frac{\lambda}{2} = k\lambda. \quad (16)$$

Bul shártti qanaatlandıratuǵın ψ múyeshine (hám usıǵan sáykes φ múyeshine) interferenciyanıń maksimumları sáykes keledi. (16)-teńlemege sáykes interferenciya jolaqları saqıyna (dóngelek) túrine iye boladı. Bul teńlemenı

$$\psi = \arccos \frac{\left(k - \frac{1}{2}\right) \lambda}{2nh} \quad (17)$$

túrinde kóshirip jazıw múmkin. Bul teńleme tóbesindegi múyeshtiń shaması ψ bolǵan (yamasa sáykes φ bolǵan) konustıń teńlemesi. Ol O linzanıń E fokallıq tegisliginde dóngelekti beredi. Solay etip interferenciya jolaqları $\psi = \text{const}$ shamasına sáykes keletuǵın dóngelekler túrinde boladı. Sonlıqtan olardı *teńdey qıyalıqlar interferenciyası* dep atadı. Interferenciya jolaqları arasındagı múyeshlik qashıqlıqtı (16)-ańlatpanıń járdeminde alıwǵa boladı. Onıń ushın bul ańlatpanı ψ hám k boyınsha differenciallaw kerek. Bunday jaǵdayda $\Delta k = 1$ ushın

$$\Delta \psi = - \frac{\lambda}{2nh \sin \varphi} \quad (18)$$

qatnasın alamız. $\sin \psi = \frac{\sin \varphi}{n}$, $\Delta \psi \ll 1$ shártleri orınlı bolǵanlıqtan $\Delta \psi = \frac{\Delta \varphi}{n}$ hám

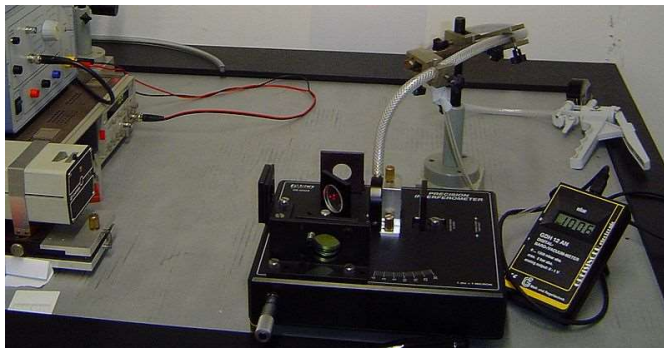
$$\Delta\varphi = -\frac{n\lambda}{2h \sin \varphi}. \quad (19)$$

Soñğı (19)-añlatpadan kórinip turǵanıday, interferenciya jolaqları arasındaǵı qashıqlıqlar φ shamasınıń ósiwi (sonıń menen birge h shamasınıń ósiwi menen) menen kemeyedi [15-26].

3-§. Maykelson interferometri

Maykelson² tárepinen dóretilgen tolqınnıń amplitudasın bóliw arqalı interferenciyanı payda etiwshi Maykelson interferometri dep atalatuǵın eki nurlı interferometr oǵada áhmiyetli optikalıq ásbaplardıń biri bolıp tabıladı. Házirgi waqıtları laboratoriyalarda paydalanılatuǵın Maykelson interferometriniń sırtqı kórinisi 9-a súwrette, al onıń optikalıq sxeması 9-b súwrette kórsetilgen [Albert Michelson; Edward Morley. "On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether". *American Journal of Science*. 1887. **34** (203): 333–345.].

2016-jılı AQSH taǵı iyinleriniń uzınlıǵı 4 km den bolǵan eki Maykelson interferometriniń (**LIGO**, ingliz tilinde *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, lazerlik-interferometrlik gravitaciyalıq tolqınlıq observatoriya) járdeminde gravitaciyalıq tolqınlardıń bar ekenligi ashıldı [Abbott, B.P.; et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) (15 June 2016). "GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence". *Physical Review Letters*. **116** (24): 241103. arXiv:1606.04855.].

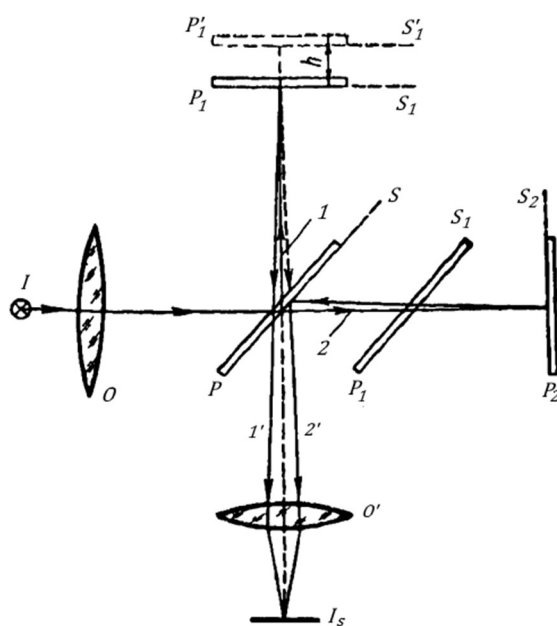


9-a súwret.

Házirgi waqıtlardaǵı
Maykelson
interferometri.

² **Albert Abraxam Maykelson** (ingliz tilinde *Albert Abraham Michelson*; 1852-jılı 19-dekabr kúni Prussiyadaǵı Strelno qalasında tuwılǵan hám 1931-jılı 9-may kúni AQSH taǵı Kaliforniya shtatındaǵı Pasadina qalasında, qaytı bolǵan) amerikalı fizik. Maykelson interferometri dep atalatuǵın interferometrdi soqqanı hám jaqtılıqtıń tezligin dál anıqlaǵanı menen belgili. 1907-jılı "dál optikalıq instrumentlerdi dóretkeni hám onıń járdeminde spektroskopiyalıq hám metrologiyalıq izertlewler júrgizgeni ushın" fizika boyınsha Nobel sıylıǵın alıwǵa miyasar boldı.

Jaqtılıq I dereginen O linzası arqalı P, P₁ hám P₂ plastinkalarına jabıstırılğan S, S₁ hám S₂ aynalarına kelip túsedi. S aynası jaqtılıqtı bóletuǵın ayna bolıp tabıladı. Ol nurlardıń aǵısın intensivlikleri birdey bolğan 1 hám 2 bólekke bóledi. 1 nurı S₁ aynasına qaray tarqaladı hám sol aynada shaǵılısıp jaqtılıqtı bóletuǵın aynaǵa qaytıp keledi. 1 nurınıń bir bólegi jaqtılıqtı bóletuǵın S aynası arqalı ótip interferenciyalanıwshı nurlardıń biri bolğan 1' nurına aylanadı. 2 nurı jaqtılıqtı bóliwshi S aynası arqalı ótip S₂ aynasına qaray júredi hám sol aynada shaǵılısıp jaqtılıqtı bóliwshi S aynasına kelip túsedi. 2 nurınıń bir bólimi S jaqtılıqtı bóliwshi aynada shaǵılısadı hám ekinshi 2' interferenciyalanıwshı nurdı payda etedi. Eki nur da O' linzasınıń járdeminde jıynaladı hám I_s noqatında interferenciyalanadı. Maykelson interferometrindegi aynalar sisteması eki tárepten S₁ hám S₂ betleri menen sheklengen qalıńlıǵı h qa teń bolğan plastinkaǵa ekvivalent. S'₂ aynası S₂ aynasınıń jaqtılıqtı bóliwshi S aynasındaǵı jormal súwreti bolıp tabıladı.



9-b súwret.

Maykelson interferometriniń optikalıq sxeması.

Aynalardıń biri S₁ (yamasa S₂) qozǵaladı, sonlıqtan 1' hám 2' nurlarınıń arasındaǵı júrisler ayırmasın eksperimentatordıń ıqtıyarı boyınsha ózgertiw múmkin (hátte nolge teń etiwge de boladı. Sonıń menen birge júrisler ayırmasınıń baǵıtın da ózgertiw múmkin (yaǵnıy interferometrdiń kelte iynin uzın iyinge

yamasa uzın iyinin kelte iyinge aylandırıw múmkin).

Maykelson interferometrinde optikalıq kósherge salıstırǵandaǵı S_1 menen S_2 aynaların qıyalıǵın ózgertiw arqalı birdey qalınlıqlar interferenciyasın (sına tárizli plastinka) yamasa teńley qıyalıq interferenciyasın (tegis parallel plastinka) ámelge asırıw múmkin. Birinshi jaǵdayda jaqtılandırıw nurlardıń parallel dástesiniń járdeminde ámelge asırıladı, al ekinshi jaǵdayda keń ashılatuǵın dáste paydalanıladı. P_3 plastinkası kompensator bolıp tabıladı. $1'$ nurı P plastinkasınıń aynasında eki ret ótetuǵın, al $2'$ nurı bul joldı ótpeytuǵın bolǵanlıqtan bul ayırmanı joq qılıw ushın P plastinkası menen birdey bolǵan P_3 plastinkası kirgiziledi [2, 4,12-14, 16-18].

Maykelson interferometriniń járdeminde hár qıylı jáne oǵada dál ólshewlerdi orınlaw múmkin. Bul pitkeriw qánigelik jumısında usınday interferometrdiń járdeminde hár qıylı zatlardıń jıllılıq keńeyiw koefficientin anıqlaw maqset etip qoyılǵan.

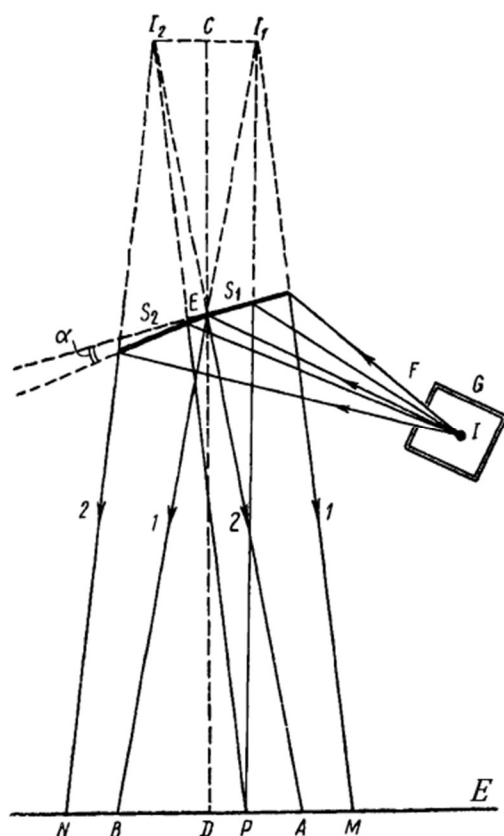
A.A.Maykelsonnıń "Jaqtılıq tolqınları hám olardıń qollanılıwı" atamasındaǵı kitabı rus tilinde 1912-jılı professor O.D.Xvalsonnıń redaktorlawında baspadan shıqtı: Svetovıe volnı i ix primeneniya/ A.A.Maykelson; Per. s angl. V. O. Xvolson; Pod red. i s dop. prof. O.D.Xvolsona. Knigoizdatelstvo MATEZIS. 1912. 2-e izd., ispr. i dop. - Moskva; Leningrad : Gos. texn.-teoretich. izd-vo, 1934 (L. : tip. im. Buxarina). - Obl., 143 s. [36].

4-§. Tolqın frontın bóliw arqalı eki nurlı interferenciyanı júzege keltiriw usılları

1. Frenel aynaları. Interferenciya qubılısın úyreniwde eki aynalı interferenciyalıq dúzilis jaqtılıq dástelerin qosıw boyınsha tuwrıdan-tuwrı ótkeriletuǵın tájiriybelardıń biri bolıp tabıladı. Bul tájiriybe birinshi ret Frenel tárepinen ótkerildi hám jaqtılıqtıń tolqınlıq qásiyetin dálilleytuǵın sheshiwshi eksperimentlerdiń qatarına kiredi.

Frenel tájiriybesiniń sxeması 10-súwrette keltirilgen. Jaqtılıqtı ótkizbeytuǵın G qabında jaylastırılǵan noqatlıq (yamasa sıızıqlı) derekten shıqqan jaqtılıq F

saňlagınan ótip S_1 hám S_2 aynalarına túsedi. Bul aynalar E sıızığı boyınsha sıızılmanıń tegisligine perpendikulyar bağıtta tutastırılǵan. Aynalar bir birine salıstırǵanda α múyeshine burılǵan. Usınıń nátiyjesinde AN hám BM dásteleri AB oblastında qosıladı. S_1 hám S_2 aynalarında shaǵılısqan nurlardı I_1 hám I_2 jormal kogerentli dereklerden shıqqan nurlar dep qarawǵa boladı. Olar S_1 hám S_2 aynalarındaǵı I dereginiń jormal súwreti bolıp tabıladı.



10-súwret.
Freneldiń aynaları.

10-súwrette kórinip turǵanıday, F saňlagınan (tesiginen) shıqqan jaqtılıq tolqınıń frontı S_1 hám S_2 aynalarında ekige bólinedi hám usı eki ayna tárepinen interferenciya baqlanatuǵın E ekranına túsiriledi. Aynalardıń sıızıqlı ólshemleri ádette jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵına salıstırǵanda úlken. Sonlıqtan bul jaǵdayda difrakciyalıq qubılıslar sezilerliktey emes. Sonlıqtan "taza túrdegi interferenciyalıq súwret" haqqında gáp ete alamız.

AB oblastında qosılatuǵın nurlardıń júrisler ayırmasın anıqlaymız. Eger jormal derekler arasındaǵı qashıqlıqtı a arqalı, al CD qashıqlıǵın L arqalı, interferenciyalıq súwrettegi P noqtasınıń onıń ortasınan qashıqlıǵın x arqalı, I_1

menen I_2 dereklerinden shıqqan jaqtılıqlardıń P noqatına kelemen degenshe payda bolǵan júrisler ayırması γ arqalı belgilesek, onda usı júrisler ayırması ushın (10-súwrette kórinip tur):

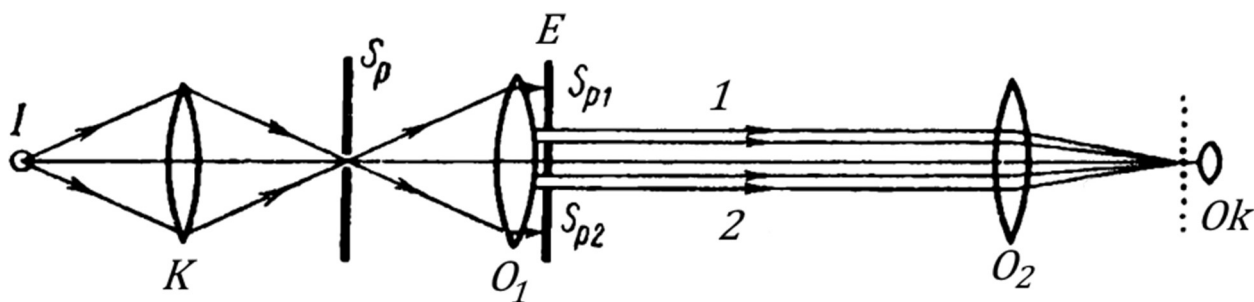
$$\gamma = \frac{a}{L} x \quad (20)$$

ańlatpasına iye bolamız. Al interferenciyalıq jolaqlar arasındaqı qashıqlıq

$$\delta x = \lambda \frac{L}{a} \quad (21)$$

formulasınıń járdeminde esaplanadı. Bul jaǵdaydaǵı intensivlikler ushın formulalar da plastinkadaǵı interferenciya ushın alınǵan formuladay boladı.

Freneldiń aynalar menen dúzilisiniń ózgerilgen kóp sanlı variantları bar: biprizma, bilinza, tuwrı dásteli hám bir aynalı Lloyd dúzilisi hám basqalar.



11-súwret. Reley interferometriniń optikalıq sxeması.

2. Reley interferometri. Reley interferometrinde (onıń optikalıq sxeması 11-súwrette keltirilgen) ayırıp alınatuǵın eki tolqın frontlarınıń diametrleri jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵınan onsha úlken emes. Demek bul jaǵdayda difrakciyalıq qubılıslardı esapqa almawǵa bolmaydı. Usıǵan qosa sezilerliktey difrakciyanıń orın alıwı bul interferometrdiń jumısın támiyinleydi.

Reley interferometriniń optikalıq sxeması 11-súwrette kórsetilgen. Jaqtılıq I dereginen shıqqan jaqtılıq K linzası arqalı S_p ekranına túsiriledi. Bul linza ózine proekciyalanǵan derektiń súwretinen "noqatlıq" derekti kesip aladı. Bul tesikten (noqatlıq derekten) shıqqan jaqtılıq dástesi O_1 linzasınıń járdeminde parallel dástege aylandırıladı hám E ekranına túsiriledi. Bul E ekranında S_{p1} hám S_{p2} bir birinen bir neshe mm qashıqlıqta jaylasqan eki kishi sańlaqlar bar (keńligi shama

menen 1 mm den) ($10 \div 15$ mm). Bul sañlaqlardan 1 hám 2 jaqtılıq dásteleri shıǵadı hám olar O_2 linzasınıń járdeminde onıń fokallıq tegisliginde jıynaladı, bir biri menen interferencyalanadı hám interferenciyalıq súwretti payda etedi. Payda bolǵan interferenciyalıq súwret Ok kúshli okulyarınıń járdeminde kórinedi.

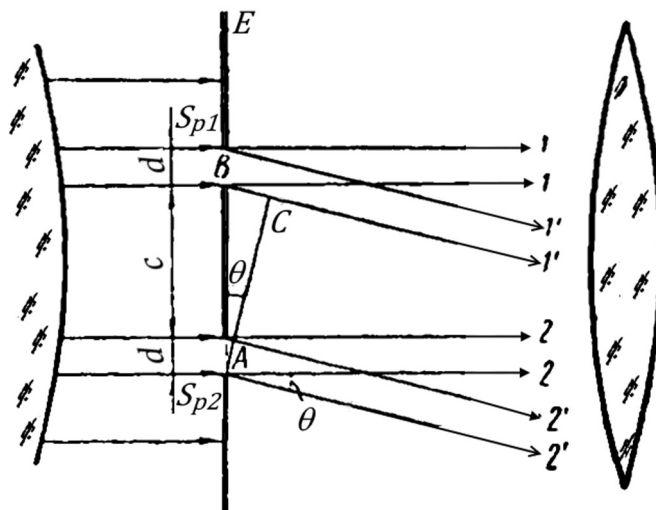
Reley interferometri suyıqlıqlar menen gazlerdegi processlerdi úyreniw ushın qollanıladı. Bunday jaǵdayda 1 hám 2 nurlardıń jolına arnawlı kyuvetalar qoyıladı.

Reley interferometriniń jumıs islewi tómendegilerden ibarat. Ekranında S_{p1} hám S_{p2} sañlaqlarında difrakciya qubılısı orın aladı (12-súwret). Usınıń nátiyjesinde tuwrı ótken 11 hám 22 nurları menen birge difrakciyalanıwshı 1'1' hám 2'2' nurlar da payda boladı. 1' hám 2' nurları arasındaǵı júrisler ayırması BC ǵa teń hám onıń mánisiniń $AB \sin \theta$ shamasına teń ekenligi sızılmada kórinip tur. $AB = c + d = b$ bolǵanlıqtan júrisler ayırması ushın

$$\gamma = b \sin \theta \quad (22)$$

ańlatpasın jaza alamız. Demek S_{p1} hám S_{p2} sañlaqlarında θ múyeshinde difrakciyaǵa ushıraǵan nurlardıń intensivligi (10)-formulaǵa sáykes formulaniń járdeminde anıqlanadı.

12-súwret.



Bir sanlaqtan θ múyeshi menen tarqalatuǵın nurdıń intensivligin I_θ arqalı belgileymiz Bunday jaǵdayda eki sañlaqtan alınatuǵın qosındı intensivlik ushın

$$I = 4I_\theta \cos^2 \frac{\pi \gamma}{\lambda} \quad (24)$$

ańlatpasın alamız. Bir sañlaqtaǵı difrakciya teoriyasınan I_θ nıń

$$I_{\theta} = I_0 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} \quad (25)$$

formulasınıń járdeminde esaplanatuǵınlıǵın bilemiz. Sonlıqtan interferenciya jolaǵı ushın intensivlik ushın tolıq formula mınaday túrge iye boladı:

$$I = 4I_{\theta} \frac{\sin^2 \left(\frac{4d \sin \theta}{\lambda} \right)}{\left(\frac{4d \sin \theta}{\lambda} \right)^2} \cos^2 \frac{\pi \gamma}{\lambda}. \quad (26)$$

Reley interferometrinde difrakciya múyeshleriniń shaması júdá kishi bolǵanlıqtan (shama menen $5 \cdot 10^{-4}$ rad hám onnan da kishi), $\sin \theta \approx \theta$ teńligi orınlanadı hám (26)-formulanı bilayınsha ápiwayı túrde jazamız:

$$I = 4I_{\theta} \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi d \theta}{\lambda} \right)}{\left(\frac{\pi d \theta}{\lambda} \right)^2} \cos^2 \frac{\pi \gamma}{\lambda}. \quad (27)$$

(27)-funkciyanıń grafikalıq túri 13-súwrette berilgen.

(27)-formuladan eki sańlaqtan alıńǵan interferenciyanıń nátiyjesinde I_0 funkciyası menen sáwlelendirilgen difrakciyalıq maksimumlardıń bir qatar mayda maksimumlarǵa bólinetuǵınlıǵı kórinedi: oraylıq maksimum bes maksimumǵa, al qaptaldaǵı maksimumlar úsh maksimumǵa bólinedi. Eger interferometrdiń iyinleriniń birewine θ dan ǵárezsiz bolǵan qosımsha júrisler ayırması kirgizilse, onda I maksimumınıń ornı awısadı. Bunday jaǵdayda júrisler ayırması

$$\gamma = b \sin \theta + \varepsilon \quad (28)$$

shamasına ózgeredi. Bul ańlatpada ε shaması θ múyeshinen ǵárezli emes, al kyuvetalarda jaylasqan zatlardıń sınıw kórsetkishleriniń ayırmasınan (n_1 hám n_2) hám kyuvetalardıń uzınlıǵı L den ǵárezli boladı, yaǵnıy

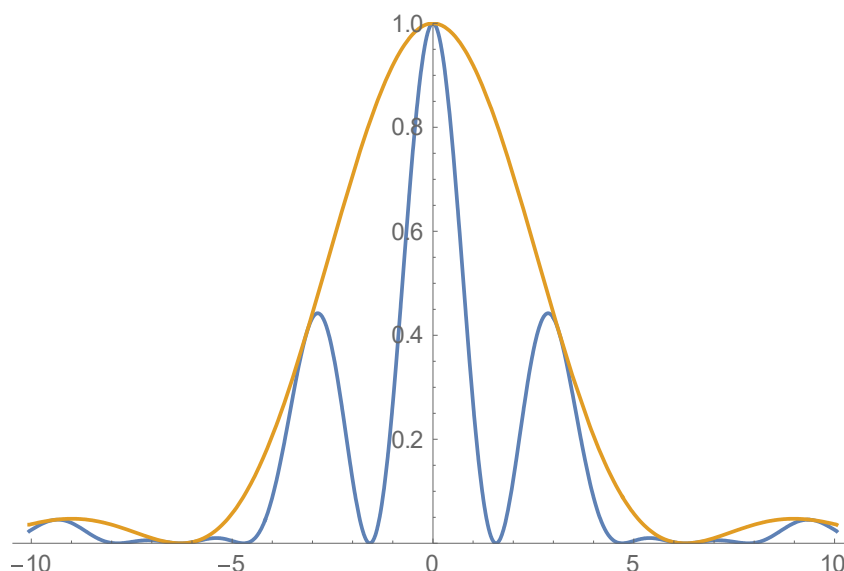
$$\varepsilon = (n_1 - n_2)L. \quad (29)$$

$\gamma = 0$ teńligine sáykes keletuǵın jolaqtıń ornı

$$\sin \theta = -\frac{\varepsilon}{b}$$

ańlatpasınıń járdeminde anıqlanadı. Nollık jolaqtı óziniń dáslepki ornına ótkeriw ushın $n_1 - n_2$ ayırmasın beretuǵın kompensator xızmet etedi.

Reley interferometri júdá ápiwayı interferometr bolıp tabıladı. Biraq sańlaqlardıń kishi bolıwına baylanıslı intensivligi júdá kishi jaqtılıq penen jumıs islewge tuwrı keledi.



13-súwret. (27)-formula boyınsha eki nurlı interferenciya ushın qurılǵan grafik (kók reńli sıızıq) hám bir sańlaqqa sáykes keletuǵın difrakciyalıq súwret (sarı sıızıq).

Grafik Mathematica 11.3 universallıq algebra sistemasınıń járdeminde sıızıldı.

Nollik maksimumnıń shaması 1 ge teń etip alındı.

5-§. I bap boyınsha juwmaqlar hám máseleń qoyılıwı

Biz joqarıda interferenciya hám difrakciya qubılısları haqqında eń tiykarǵı bolǵan maǵlıwmatlardı berdik. Ádette, kóp sanlı oqıw hám ilimiy ádebiyatlarda interferenciya menen difrakciya arasındǵı ayırmaǵa itibar berilmeydi. Al "taza interferenciya" qubılısı haqqındǵı maǵlıwmatlar haqıyqatında geypara jaǵdaylarda interferenciya (keńisliktiń berilgen noqatlarındǵı tolqınlardıń bir birin kúsheytiwi yamasa sóndiriwi) menen difrakciya (tosqınlıqlar arqalı ótkende jaqtılıqtıń tuwrı sıızıq boyınsha tarqalmay, nátiyjede tolqınlıq qásiyetiniń kóriniwi) qubılısları arasındǵı principiallıq ayırmanıń bar ekenliginen derek beredi.

Eki tolqınlı interferenciya haqqında tolıq gáp etildi. Bunday interferenciyanıń júzege keliwiniń optikalıq sxemaları talqılandı. Nátiyjede interferenciya qubılısın

baqlaw arqalı joqarı dálliktegi optikalıq ólshewlerdi (optikalıq metrologiyalıq ólshewlerdi) ámelge asırıwdıń mǘmkinshiligi, dálliktiń jaqtılıqtıń tolqın uzınlıǵı menen barabar ekenligi ayqın túrde ayılıp ótti.

Usınday tallawlardıń tiykarında fizikanıń basqa da tarawlarına tiyisli bolǵan ayırım ólshewlerdi optikalıq usıllardıń, atap aytqanda eki tolqınlı Maykelson interferometriniń járdeminde ámelge asırıwǵa bola ma degen tábiyiy soraw tuwıladı. Biz usınday kishi bolǵan shamalardı dál ólshew máselesin názerde tutıp atırımız. Bunday kishi fizikalıq shamalardıń qatarına qattı denelerdiń jıllılıq keńeyiw koefficientin jatqarıwǵa boladı (hár qıylı zatlarda shaması $10^{-5} - 10^{-6} 1/T$ shamasında). Usı tiykarda molekualıq fizika laboratoriyasında ótkeriletuǵın dilatometriyalıq ólshewlerdi eki tolqınnıń interferenciyası qubılısınan paydalanıp optika laboratoriyasında ámelge asırıwdı maqset etip qoydıq.

Joqarıda ayılǵanlarǵa muwapıq bul pitkeriw jumısı eki nurlı interferenciya qubılısın (atap aytqanda Maykelson interferometrin) bir qatar qattı denelerdiń jıllılıq keńeyiw koefficientiniń mánislerin dál (preciziyalıq) ólshew maqsetinde orınladı.

II BAP. ALÍNGAN SANLÍ HÁM EKSPERIMENTALLÍQ NÁTIYJELER

6-§. Alınatuǵın sanlı maǵlıwmatlardı aldın ala bahalaw

Biz birinshi gezekte kóp tarqalǵan ayırım qattı denelerdiń (polattıń, latunnıń hám shiysheniń) jıllılıq keńeyiw koefficientleri haqqında gáp etemiz [<https://de.wikipedia.org/wiki/Ausdehnungskoeffizient>].

Fizika iliminde kólemlik jıllılıq keńeyiw koefficienti dep

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_p$$

shamasın túsinedi. SI sistemasında da, SGS sistemasında da ólshem birliǵı 1/T (keri temperatura) bolıp tabıladı.

Sızıqlı jıllılıq keńeyiw koefficienti dep

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \left(\frac{dL}{dT} \right)_p$$

shamasın túsinemiz. Onıń ólshem birliǵı de K⁻¹ yamasa C⁻¹ bolıp tabıladı.

Mısal retinde polatlar ushın α_L sızıqlı jıllılıq keńeyiw koefficientiniń 10⁻⁶ K⁻¹ birliklerindeki mánislerin beremiz.

[https://ru.wikipedia.org/wiki/Koefficient_teplovogo_rasshireniya]:

Polattıń markası	20- 100 °C	20- 200 °C	20- 300 °C	20- 400 °C	20- 500 °C	20- 600 °C	20- 700 °C	20- 800 °C	20- 900 °C	20- 1000 °C
08kp	12,5	13,4	14,0	14,5	14,9	15,1	15,3	14,7	12,7	13,8
08	12,5	13,4	14,0	14,5	14,9	15,1	15,3	14,7	12,7	13,8
10kp	12,4	13,2	13,9	14,5	14,9	15,1	15,3	14,7	14,8	12,6
10	11,6	12,6	-	13,0	-	14,6	-	-	-	-
15kp	12,4	13,2	13,9	14,5	14,8	15,1	15,3	14,1	13,2	13,3
15	12,4	13,2	13,9	14,4	14,8	15,1	15,3	14,1	13,2	13,3

20kp	12,3	13,1	13,8	14,3	14,8	15,1	20	-	-	-
20	11,1	12,1	12,7	13,4	13,9	14,5	14,8	-	-	-
25	12,2	13,0	13,7	14,4	14,7	15,0	15,2	12,7	12,4	13,4

Joqarıdağı keste de polattıń markalarınıń oǵada kóp ekenligi kórinip tur.

SHıyshe ushın sızıqlı keńeyiw koefficientiniń mánisi $3,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$, al latun ushın $18,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ shamasına teń.

[http://temperatures.ru/pages/temperaturnyi_koefficient_lineinogo_rasshireniya].

Biz interferenciyalıq súwrettegi intensivliktiń (10)-formula boyınsha tarqalatuǵınlıǵın bilemiz (6-b súwret). Endi biz ekrandağı jolaqlardıń baǵıtına perpendikulyar bolǵan baǵıttaǵı koordinatını x arqalı belgilesek

$$I = 4 I_0 \cos^2 \frac{\pi x}{\lambda}$$

ańlatpasına iye bolamız. Bul formuladağı $\frac{\pi x}{\lambda}$ shaması júrisler ayırması menen baylanıslı. Sonıń menen birge x tıń ózgeriwi menen interferenciyalanatuǵın nurlar arasındagı júrisler ayırması ózgeredi hám ekrandağı sáykes orınlarda interferenciyalıq jolaqlar payda boladı.

Kosinus funkciyasınıń dáwiri 2π ge teń. Sonlıqtan sol dáwirge sáykes keliwshi x tıń mánisin tabıw ushın $\frac{\pi x}{\lambda} = 2\pi$ teńliginen paydalanıp, $x = 2\lambda$ shamaǵa ózgergende dáwirli $\cos^2 \frac{\pi x}{\lambda}$ funkciyasınıń mánisiniń óziniń dáslepki mánisine kóremiz. Demek, fazanıń mánisi π shamasına ózgergende interferenciyalıq maksimumınıń qońsılas maksimumlardıń arasındagı qashıqlıqtay aralıqqa jılıytuǵınlıǵın, yaǵnıy qońsılas maksimumlardıń orınlarrınıń almasatuǵınlıǵın kóremiz. Eger Maykelson interferometriniń bir iyyindegi aynanı uzınlıǵı belgili hám onıń shaması temperaturanıń ózgeriwi menen ózgeretuǵın sterjenge bekitsek, onda payda bolǵan interferenciyalıq súwrettegi jolaqlardıń temperaturanıń ózgeriwi menen jılısıwın, atap aytqanda sterjenniń uzınlıǵı 2λ shamasına ózgergende qońsılas jolaqlardıń orın almasatuǵınlıǵın kútiwimiz kerek. Sonlıqtan (10)-formulaǵa sáykes formulanı bılayınsha jazamız:

$$I = 4 I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} (x\lambda + \alpha L_0 \Delta T) \right).$$

Bul formulada α arqalı jıllılıq keńeyiw koefficienti, L_0 arqalı sıızıqlı keńeyiw koefficienti ólshenip atırǵan sterjenniń uzınlıǵı (temperaturanıń dáslepki mánisindegi uzınlıǵı), al ΔT arqalı temperaturanıń ósimi belgilengen.

$$\alpha L_0 \Delta T$$

arqalı jıllılıq keńeyiwiniń saldarınan temperatura ΔT shamasına óskendegi sterjenniń uzınlıǵınıń ósimi belgilengen.

Formulada keltirilgen shamalardıń mánislerin bahalaymız.

Geliy neonlı lazer ushın $\lambda = 632,8$ nm. Sonlıqtan qońsılas eki jolaq arasındadıǵı qashıqlıqqa $\alpha L_0 \Delta T$ shamasınıń λ ge teń shaması sáykes keliwi kerek (joqarıda keltirilgen formulada kosinus funkciyasınıń kvadratınıń turǵan ekenligine baylanıslı). Olay bolsa $L_0 = 10$ sm bolǵan polat sterjenniń λ shamasına uzayıwı ushın $\alpha L_0 \Delta T = \lambda$ teńlemesinen $L_0 = 1$ cm uzınlıǵı ushın $\Delta T = \frac{\lambda}{\alpha L_0} = 4,52$ gradustı alamız.

Demek uzınlıǵı 10 sm ge teń bolǵan polat sterjendi 1 sm ge qozǵalǵanda interferenciyalıq jolaqlardıń jıljıwınıń saldarınan qońsılas jolaqlar orın almasadı eken (tap sol sıyaqlı uzınlıǵı 60 sm bolǵan sterjenniń temperaturası 0,07533 gradusqa ózgergende qońsılas interferenciyalıq jolaqlardıń orınlarınıń ózgeretuǵınlıǵın kóremiz.

Endi matematikalıq modellestiriw ushın jazılǵan komandalar hám esaplawlar jolı menen alınǵan nátiyjelerdi keltiremiz.

Esaplawlar ushın beriletuǵın maǵlıwmatlar mınalardan ibarat:

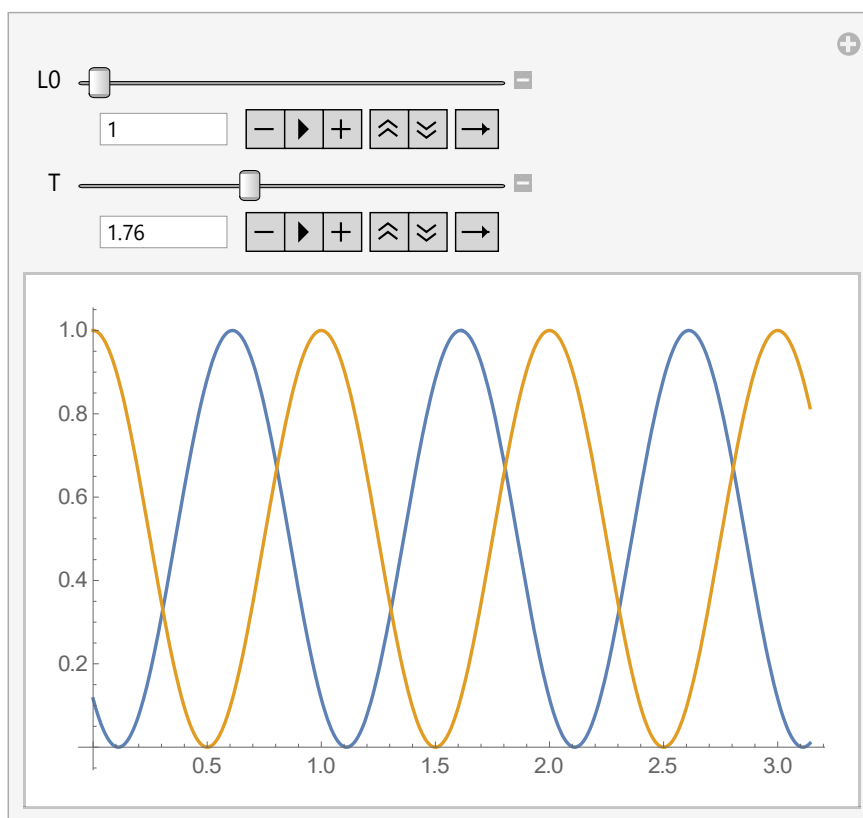
$$I_0 = 1; \lambda = 632,8 \cdot 10^{-9}; \alpha = 14 \cdot 10^{-6};$$

Bul ańlatpalarda I_0 arqalı tolqınıń maksimum intensivligi, $\lambda = 632,8 \cdot 10^{-9}$ arqalı geliy-neonlı lazerden shıǵatuǵın jaqtılıqtıń metrlerdegi tolqın uzınlıǵı, $\alpha = 14 \cdot 10^{-6}$ arqalı polat uzın jıllılıq keńeyiw koefficienti belgilengen.

Grafikalıq súwretti payda etiw ushın

Manipulate[Plot[{I0(Cos[$\frac{\text{Pi}}{\text{lam}}$ (lam x + alfaL0 0.01T))]^2, I0(Cos[Pi x])^2}, {x, 0, Pi}], {L0, 1, 61, 10}, {T, 0, 4.52}]

túrindegi komanda jazıladı. Bul komanda boyınsha eki sıızıq: $T = 0$ bolǵan jaǵdayda alınatuǵın interferenciyalıq maksimumlar ushın sıızıq penen Manipulate komandasınıń járdeminde berilgen T temperaturada alınatuǵın maksimumlar sıızıladı. $\{T, 0, 4.52\}$ qawsırmasınıń ishinde turǵan sanlar temperatura T nıń 0 den 4,52 gradusqa shekem ózgeretuǵınlıǵın bildiredi (biz 4,52 nıń ornına ıqtıyarlı túrde qálegen sandı jazıwımız múmkin). Alınǵan grafik mınaday túrge iye boladı (14-súwret):



14-súwret. Temperaturanıń eki mánisi ushın ($T = 0$ hám $T = 1,76$ gradus ushın alınǵan interferenciyalıq iymeklikler.

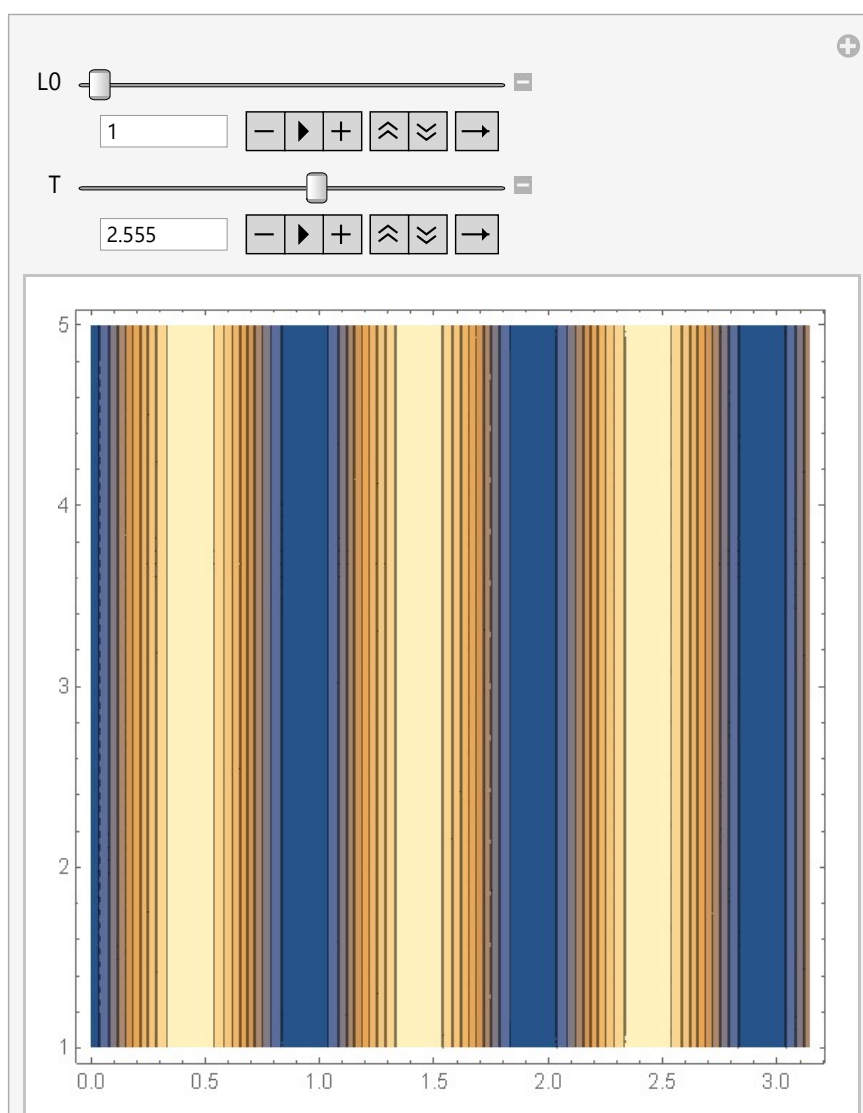
14-súwrette kórinip turǵanıday, sterjenniń uzınlıǵı $L0 = 1$ sm, al temperatura $T = 1,76$ gradus. Sarı sıızıqqa $T = 0$ bolǵan jaǵdaydaǵı interferenciyalıq sıızıq, al kók sıızıqqa $T = 1,76$ gradus bolǵan jaǵdayda alınatuǵın interferenciyalıq

maksimumlar sáykes keledi. Temperaturanıń $T = 0$ mánisi sterjenniń temperaturasınıń dáslepki mánisine sáykes keledi.

Joqarıda keltirilgen grafiktiń ornına interferenciyalıq jolaqlardan turatuǵın grafikalıq súwretti de alıw múmkin (15-súwret). Onıń ushın grafikalıq ContourPlot komandasınan paydalanamız hám

Manipulate[ContourPlot[{I0(Cos[$\frac{\pi}{\lambda m}$ (lam x
+ alfa L0 0.01 T))]²}, {x, 0, Pi}, {y, 1, 5}], {L0, 1, 61, 10}, {T, 0, 4.52}]

túrindegi komandanı (komandalıq qatardı) jazamız. Nátiyjede mınaday grafikalıq súwretke iye bolamız:



15-súwret. Interferenciyalıq jolaqlardı modellestiriwdiń nátiyjeleri. Sterjenniń uzınlıǵı 1 sm, al temperatura 2,555 gradus. 14-súwret penen salıstırıw kók reńli jolaqlarǵa interferenciyalıq minimumnıń sáykes keletuǵınlıǵın kórsetedi.

7-§. Qattı denelerdiń sıızıqlı keńeyiw koefficientiniń temperaturadan ǵárezligin ádettegi mikrometrdiń járdeminde ólshew

Qabıl etilgen standartlar boyınsha bul jumıs molekualıq fizika boyınsha qoyılǵan laboratoriyalıq jumıslardıń arasında P2.1.1.3 shifrına iye.

Jumıstıń maqseti:

Latunniń, polattıń hám shiysheniń sıızıqlı keńeyiw koefficientleriniń temperaturadan ǵárezliklerin ólshew;

Latunniń, polattıń hám shiysheniń sıızıqlı keńeyiw koefficientlerin anıqlaw.

Jumıstıń principi

Qattı deneniń uzınlıǵı l temperatura menen sıızıqlı túrde baylanısqa:

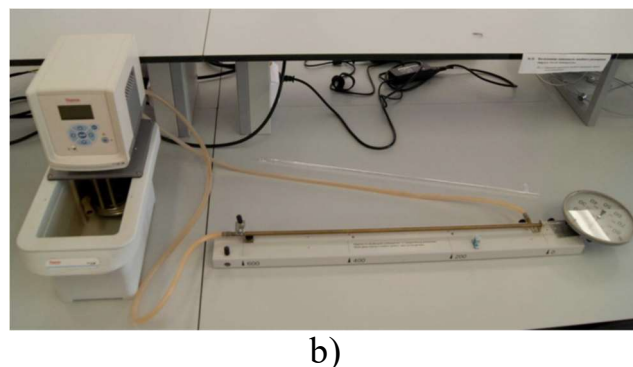
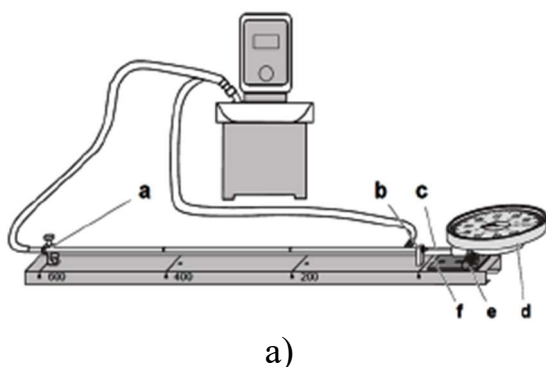
$$l = l_0(1 + \alpha t). \quad (30)$$

Bul ańlatpada l_0 arqalı temperatura $t = 0$ bolǵan jaǵdaydaǵı deneniń uzınlıǵı, t arqalı temperatura, al α arqalı sıızıqlı keńeyiw koefficienti belgilengen.

Sıızıqlı keńeyiw koefficienti α niń mánisi izertlenip atırǵan materialdıń tábiyatınan ǵárezli.

Bul jumısta suwdı qızdırıw ushın cirkulyarlıq termostat paydalanıladı. Bul termostattıń járdeminde temperaturanıń belgili mánisine shekem qızdırılǵan suw hár qıylı materiallardan soǵılǵan naylar arqalı ótedi.

Dóngelek túrdegi 0,01 millimetrlik shkalaǵa iye ásbap hár qıylı temperaturalardaǵı sol naylardıń uzınlıǵın ólshew ushın paydalanıladı. Al $l - l_0$ shaması bolsa temperatura t niń funkciyası bolıp tabıladı.



16-súwret. Naylardıń uzınlıǵın temperaturanıń funkciyası sıpatında sıızıqlı keńeyiwdi ólshew ushın arnalǵan eksperimentallıq dúzilistiń sxema túrindegi kórinisi. a – sxema túrindegi dúzilis, b – paydalanılǵan dúzilistiń fotosúwreti.

Zárúrli bolǵan ásbaplar menen zatlar

➤ 1. Boylıq keńeyiw D nı ólshew ushın ásbap.	Apparatus 1 Longitudinal expansion apparatus D..... 381 341 1 Dial gauge, 10 mm..... 361 15 1 Holder for dial gauge 381 36 1 Thermometer -10 ... +110°C..... 382 34 1 Circulation thermostat +25 ... +100 °C..... 666 768 1 Pump set 666 7703 2 Silicone tubing, 7 mm Ø..... 667 194 2 Water, pure, 5 l..... 675 3410
➤ 2. Sanlı indikator.	
3. Sanlı indikatordı uslap turıwshı dúzilis.	
4. -10 °C dan +110 °C ǵa shekemgi temperaturalardı ólsheytuǵın termometr.	
+25 °C dan +100 °C shekem qızdıratuǵın cikrulyaciyalıq termostat.	
➤ Nasos.	
Diametrleri 7 mm bolǵan silikon naylar.	
Taza suw (5 litr).	

Eksperimentallıq dúzilis

Eksperimentallıq dúzilis sxema túrinde 16-súwrette kórsetilgen.

- Sanlı indikatordı uslap turıwshı dúzilistegi vintti qatırınız hám onı d arqalı belgilengen orıńǵa jaylastırınız.
- Keńeytiwshi apparattıń qozǵalmaytuǵın súyenishin 600 belgisiniń tusına ornalastırınız hám latunnan islengen naydıń ashıq ushın qozǵalmaytuǵın súyenishke qaray áste-aqırınlıq penen jılıtıńız.
- Latunnan islengen naydıń jabıq ushın (b) naydıń tutastıratuǵın bólimdi shlang tutasıp turǵan orın (f) tómende qarap turatuǵınday etip jılastırınız (burıńız).
- Latunnan islengen naydı qozǵalmaytuǵın bólimin (c) súyenishtiń ústine jaylastırıp ushın vintti qatırınız (naydıń saqıyna tárizli oyıqlarına vinttiń kiriwi kerek).

➤ Cirkulyaciyalıq termostattı jumıstı orınlaw ushın tayarlańız hám onı tarmaqqa jalǵańız. Jumıstı islewdiń usılları menen tereńirek tanısıw ushın instrukciyanıń 666 768 betine qarańız).

➤ Cirkulyaciyalıq termostattıń vannasın distillyaciyalanǵan suw menen toltırıńız.

➤ Ásbaptı cirkulyaciyalıq termostat penen silikon naylardıń járdeminde tutastırıńız (yaǵnıy latin naydıń ashıq ushı menen shlangtıń ashıq ushın (f) termostattıń ushı menen tutastırıńız.

➤ Suw vannanıń temperaturası t_n nı ólshew ushın termometrdi paydalanıńız.

Dıqqat awdarıńız:

Cirkulyaciyalıq termostattı paydalanbastan burın onıń instrukciyasın dıqqat penen oqıp shıǵıw kerek boladı.

Qáwipsizlik texnikası

1. Jumıstı baslawdıń aldında ıssı suwdıń sırtqa aqpawı hám sonıń saldarınan átiraptaǵı adamlarǵa zıyanın tiygizbewi ushın silikonlıq tutastırıwları tekserip shıǵıńız.

2. Cirkulyaciyalıq teomrstattı paydalanıw boyınsha berilgen keńeslerdi hám tártiplerdi bulıtpay orınlańız.

3. Shiyshe nay menen jumıs islegenıńizde apparattıń táriyiplemesinde keltirilgen barlıq tártiplerdi saqlańız.

Eksperimentlerdi ótkeriw

– Sanlı indikatordıń korpusın nolge alıp keliw ushın burańız.
– ójire temperaturasın, yaǵnıy t_0 shamasın ólsheniz.
– Cirkulyaciyalıq termostattı iske qosıńız hám temperaturanıń mánisin t_0 den shama menen 5 gradusqa joqarı etip qoyıńız.

– Termodinamikalıq teń salmaqlıq halı júzege kelemen degenshe kútip turıńız.

- Temperatura t nıń mánisin ólsheńiz.
- Sanlı indikatordıń kórsetiwin jazıp alıńız.
- Temperatura t nıń mánisin 5°C adımı menen shama menen 100°C ға shekem kóterińiz.
- Latun naydıń temperaturasını ójire temperaturalarına shekem tómenletıńiz.
- Latun naydı polattın islengen nay menen almasırıńız hám onı joqarıda keltirilgen tártipte qozǵalmaytuǵın súyenishtiń ústine qatırıńız.
- Latun nay menen islengen ólshewlerdi qaytalańız hám ásbaplardıń kórsetiwlerin jazıp alıńız. Temperaturanı barlıq waqıtta da 5 graduslıq adım menen kóterińiz.
- Eksperimentlerdi shiysheden islengen nay ushın qaytalańız.

Eksperimentti ótkeriw ushın misal

1-keste.

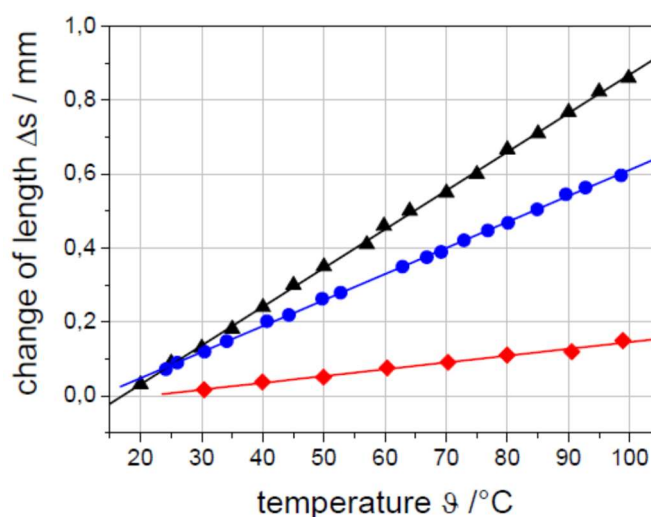
Uzınlıq Δl dıń temperatura t dan ǵárezli sıpatında ólshengen shamalardıń
shamaları (latun – latun, stal – polat, steklo – shiyshe)

Latun		Polat		SHiyshe	
$t, ^{\circ}\text{C}$	$\Delta l, \text{mm}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$\Delta l, \text{mm}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$\Delta l, \text{mm}$
20,0	0,03	24,1	0,07	30,4	0,02
25,0	0,09	26,0	0,09	39,9	0,04
30,0	0,13	30,5	0,12	49,9	0,05
35,0	0,18	34,1	0,15	60,3	0,08
40,0	0,24	40,7	0,20	70,3	0,09
45,0	0,30	44,3	0,22	79,9	0,11
50,0	0,35	49,7	0,26	90,5	0,12
57,0	0,41	52,7	0,28	98,9	0,15
59,0	0,46	62,8	0,35		
64,0	0,50	66,8	0,38		
70,0	0,55	69,1	0,39		

75,0	0.60	72,9	0,42		
80,0	0,67	76,8	0,45		
85,0	0,71	80,1	0,47		
90,0	0,77	84,9	0,51		
95,0	0,82	89,6	0,55		
99,8	0,86	92,8	0,56		
-	-	98,6	0,60		

Bul keste de keltirilgen maǵlıwmatlardı P2.1.1.3 jumısında tómendegidey grafik túrinde kórsetken:

17-súwret.
1-keste de keltirilgen maǵlıwmatlar boyınsha dúzilgen grafikler.



Esaplawlar hám nátiyjeler

Ólshewlerdiń nátiyjeleri 1-keste de berilgen.

Sızıqlı keńeyiw koefficienti α nıń temperaturadan ǵárezligin anıqlaw ushın Δl shamaların ólshewler tiykarında 1-keste de keltirilgen maǵlıwmatlar boyınsha grafik sızıladı (8-11 súwretler).

(30)-ańlatpanıń eki tárepinen de dáslepki uzınlıq l_0 dıń shamasın alıp taslap uzınlıqtıń ózgerisi ushın mınaday ańlatpalardı ala alamız:

$$\begin{aligned}
 l - l_0 &= l_0 \alpha t, \\
 \Delta l &= kt.
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

Bul ańlatpada $k = l_0 \alpha$.

(31)-a'nlarpalardı  lshewlerdi n barısında alınan mađlıwmatlar tiykarında sızılıqlı t rde approksimaciyalaw sızılıqlı ke eyiw koefficientini n m nisin beredi. N tiyjeler 2-kestede berilgen.

2-keste.

11-s wret h m (2)-a'nlarpalar tiykarında anıqlanđan sızılıqlı ke eyiw koefficientleri α ni n m nisleri

Material	$\Delta l, mm$	Eksperiment, α, K^{-1} .	�debiyattan alınan mađlıwmatlar, α, K^{-1} .
Latun	600	$17,8 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$
Polat	600	$11,7 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-6}$
SHiyshe	600	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$

Material	$\frac{\Delta s}{mm}$	Measurement $\frac{\alpha}{K^{-1}}$	Literature $\frac{\alpha}{K^{-1}}$
brass	600	$17.8 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$
steel	600	$11.7 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-6}$
glass	600	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$

Qosımsha mađlıwmatlar

Sızılıqlı jılılıqlı ke eyiwi koefficientini n mánisi qosımsha t rde naydı n tolıqlı uzınıqlı qosımsha t rde tolıqlı uzınıqlı l_0 di n funkciyası t rinde  lsheniwi m mkin. Sızılıqlı ke eyiwdi n temperaturalardı n ayırması $t - t_0$ di n funkciyası sıpatında anıqlaw procedurası P2.1.1.2 instrukciyasında berilgen.

Cirkulyaciyalıqlı termostattı n ornına P2.1.1.2 puw generatorın paydalanıw uzınıqlı Δl di n  zgeriwin anıqlawđa m mkinshilik beredi. Usınday jollar menen ke eyiwdi n sızılıqlı koefficientini n mánisin (mısalı, 200mm, 400 mm h m 600 mm bolđan h r qıylı uzınıqlarđa iye bolđan latunnan islengen naylardı n) cirkulyarlıqlı termostattı n járdeminde anıqlanđan dáslepki t_0 h m aqırđı t_1 temperaturalardı n mánislerin biliw arqalı anıqlaw m mkinshiligi payda boladı ( sbaptı n instrukciyası menen tanısıw usınıladı).

8-§. Jıllıq keñeyiw koefficientlerin Maykelson interferometriniń járdeminde anıqlaw

18-súwrette paydalanılğan eksperimentallıq dúzilistiń ulıwmalıq fotosúwreti kórsetilgen. Bul súwrettiń shep tárepinde Maykelson interferometri, al óń tárepinde izertlenetuǵın úlgiye berilgen temperatura beretuǵın dúzilis (P2.1.1.3 laboratoriyalıq jumısında qollanılatuǵın dúzilis)



18-súwret.
Paydalanılğan
eksperimentallıq
dúzilistiń fotosúwreti.

Eksperimentlerdiń barısında latun, polat hám shiyshe sterjenler paydalanıldı. ólshewler temperatura joqarılaǵanda da, tómengende de júrgizildi.

Eger biz latunnıń jıllıq keñeyiw koefficientiniń $18 \cdot 10^{-6}$ 1/grad ekenligin esapqa alsaq, onda temperatura 1 gradusqa kóterilgende uzınlıǵı 10 sm bolǵan sterjenniń uzınlıǵınıń $10 + 10 \cdot 18 \cdot 10^{-6}$ sm = 10,0002 sm ge teń bolatuǵınlıǵın kóremiz (demek, absolyut uzayıwdıń shaması 0,0002 sm ge teń. Demek onıń uzınlıǵı 2000 nm shamaǵa uzayadı degen sóz. Bunday jaǵdayda tolqın uzınlıǵı 632,8 nm ge teń geliy-neonlı lazerdi paydalanǵanda jolaqtıń ornı $2000:632,8 = 2,8445$ jolaqtıń ornına jılısadı degen juwmaqqa kelemiz.

Tap sol sıyaqlı shiyshe menen polat bolǵan jaǵdaylarda jolaqlardıń sáykes 0,47 hám 1,74 jolaqtıń keńligindey aralıqqa jılıyatuǵınlıǵına iye bolamız.

Tiykargı eksperimentler temperatura tómenlegen jaǵdaylar ushın orınladı. Biz 20-50°C intervaldaǵı jıllıq keńeyiw koefficientleriniń mánislerin interferenciyalıq jolaqlardıń temperaturaǵa baylanıslı jılıwlarınń shaması boyınsha anıqladıq. Temperaturaǵa baylanıslı interferenciyalıq jolaqtıń qansha shamaǵa jılıǵanlıǵı tiykargı eksperimentallıq maǵlıwmat sıpatında qabıl etildi.

Biz ádebiyattan latun ushın onıń ximiyalıq quramına baylanıslı jıllıq keńeyiw koefficientiniń $20 \cdot 10^{-6}$ 1/grad shamasınan $17 \cdot 10^{-6}$ shamasına shekem ózgeretuǵınlıǵın bilemiz. SHiyshe ushın úlken diapazonda ózgeredi, al polat ushın da ximiyalıq quramına baylanıslı úlken diapazondaǵı shamalardı alamız [37-38].

Eksperimentlerdiń nátiyjeleri tómendegi kestede berilgen:

Maykelson interferometrindedi dilataciyalıq izertlewlerdiń barısında anıqlanǵan sızıqlı keńeyiw koefficientleri α niń mánisleri

Material	Eksperiment, α, K^{-1} .
Latun	$17,8 \cdot 10^{-6}$
Polat	$12 \cdot 10^{-6}$
SHiyshe	$3,1 \cdot 10^{-6}$

Biz joqarıda oqıw laboratoriyalarında paydalanılatuǵın Maykelson interferometriniń járdeminde qattı denelerdiń jıllıq keńeyiwi koefficientin anıqlawdıń principiallıq jaqtan múmkin ekenligin kórsettik. Ótkerilgen eksperimentlerde izertlenetuǵın zat ushın sterjen túrindegi úlginı alıwdıń yamasa temperaturanı ózgertiw adımın onlaǵan gradus etip alıwdıń maqsetke muwapıq keletuǵınlıǵın kelip shıqtı. Usınday jaǵdaylarda uzınlıqtı ádettegi mikrometrlerge salıstırǵanda dállici joqarı bolǵan nátiyjelerge iye bolıw múmkin.

Álbette, temperatura ózgergende izertlenetuǵın úlginin bir noqatınıń ornınıń ózgermewiniń shárt ekenligin óz-ózinen túsinipli.

Biraq, kóplegen eksperimentlerde, ásirese joqarı hám tómengi (azot yamasa geliy temperaturaları) temperaturalarda kópshilik jaǵdaylarda ólshemleri 1 sm den úlken úlgiardi paydalanıw maqsetke muwapıq kelmeydi (ádette kriostatlarda yamasa joqarı temperaturalı dúzilislerde sıızılıq ólshemleri mm bolǵan úlgiar izertleniledi). Bunday jaǵdayda jıllılıq keńeyiwı koefficientiniń shamasın ólshew ushın Maykelson intenferometri (tap sol sıyaqlı basqa da optikalıq usıllar) jaramaydı. Bunday jaǵdayda kristallar rentgenografiyasınıń usıllarınan paydalanıw maqsetke muwapıq keledi.

Biz kristallıq denelerdegi atomlıq tegislikler arasındadı qashılıq d nıń difrakciyalıq múyesh θ hám paydalanıp atırǵan monoxromat rentgen nurlarınıń tolqın uzınılıǵı λ arasında $2d \sin \theta = n\lambda$ túrindegi qatnastıń bar ekenligin bilemiz (bul qatnastı Vulf-Bregg teńlemesi dep ataydı). Bul formuladıǵı d shaması temperaturadan ǵárezli, yaǵnıy $d = d(t)$. Temperatura t nıń hám bir mánisine atomlıq tegislikler arasındadı qashılıq d nıń bir mánisi sáykes keledi. Usı sáykeslik tiykarında rentgen difraktometrinde temperaturanıń hár bir mánisine sáykes keletuǵın difrakciyalıq múyesh θ nıń shamasın, onnan keyin alıńǵan maǵlıwmat boyınsha Vulf-Bregg teńlemesi tiykarında d nıń mánisin esaplaw múmkin. Usınday jollar menen alıńǵan $d(t)$ funkciyasınıń grafigi boyınsha kristallıq denelerdiń hár qıylı temperaturalar intervallarındaǵı jıllılıq keńeyiw koefficientleriniń mánislerin hám kristallardaǵı fazalıq ótiwler sıyaqlı fizikalıq qubılıslardıń orın alıwı sıyaqlı máselelerdi sheshiw múmkin.

PITKERIW QÁNIGELIK JUMÍSÍ BOYÍNSHA ULÍWMALÍQ JUWMAQLAR

1. Eki nurlı optikalıq interferometr bolǵan oqıw laboratoriyalarında qollanılatuǵın geliy-neonlı lazerde isleytuǵın Maykelson interferometriniń járdeminde dilatometriyalıq ólshewler – latunnıń, polattıń hám shiysheniń $20^0 - 100^0\text{C}$ intervalındaǵı jıllılıq keńeyiwi koefficientleriniń mánisleri jetkilikli dárejede joqarı dállikte alındı. Pitkeriw qánigelik jumısında optikalıq usıllar menen jıllıq keńeyiwi koefficientin ólshewdiń principiallıq múmkinshilikleri, olardıń artıqmashlıqları menen kemshilikleri ashıp kórsetildi.

2. Jıllılıq keńeyiwi koefficientin ólshew sıyaqlı dilatometriyalıq ólshewler júrgiziwdegi jetiliwi múmkin bolǵan dálliktiń shaması bahalandı.

3. Alınǵan eksperimentallıq nátiyjeler tiykarında pitkeriw qánigelik jumısında jıllılıq keńeyiwi koefficientin ólshew ushın arnalǵan optikalıq usıldı ayırım laboratoriyalarda paydalanıw boyınsha usınıslar islep shıǵıw múmkin.

PAYDALANÍLGAN ÁDEBIYATLARDÍŇ DIZIMI

1. Ф.А.Королев. Теоретическая оптика. Издательство "Высшая школа". Москва. 1966. 555 с.
2. Д.Ж.Каули. Физика дифракции. Издательство "Мир". Москва. 1979. 431 с.
3. П.Я.Уфимцев. Основы физической теории дифракции. Авторский перевод с английского П.Я.Уфимцева. 3-е издание (электронное). Москва. БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 353 с.
4. Х.Хёнл, А.Мауэ, К.Вестпфаль. Теория дифракции. Перевод с немецкого. Издательство "Мир". Москва. 1964. 428 с.
5. Justin Peatross, Michael Ware. Physics of Light and Optics. 2015 Edition January 29, 2019. http://optics.byu.edu/BYUOpticsBook_2015.pdf.
6. SAMUEL J. LING, TRUMAN STATE UNIVERSITY JEFF SANNY, LOYOLA MARYMOUNT UNIVERSITY WILLIAM MOEBS. University Physics. Volume 1. OpenStax Rice University 6100 Main Street MS-375. Houston, Texas 77005. 994 p.
7. SAMUEL J. LING, TRUMAN STATE UNIVERSITY JEFF SANNY, LOYOLA MARYMOUNT UNIVERSITY WILLIAM MOEBS. University Physics. Volume 2. OpenStax Rice University 6100 Main Street MS-375. Houston, Texas 77005. 810 p.
8. SAMUEL J. LING, TRUMAN STATE UNIVERSITY JEFF SANNY, LOYOLA MARYMOUNT UNIVERSITY WILLIAM MOEBS. University Physics. Volume 3. OpenStax Rice University 6100 Main Street MS-375. Houston, Texas 77005. 608 p.
9. UNIVERSITY PHYSICS. 13TH EDITION. HUGH D., YOUNG, CARNEGIE MELLON UNIVERSITY, ROGER A. FREEDMAN, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SANTA BARBARA CONTRIBUTING AUTHOR A. LEWIS FORD, TEXAS A&M UNIVERSITY. 1598 p.
10. И.Е.Иродов. Волновые процессы. Москва: Бином. Лаборатория базовых знаний. 2010.

11. И.Е.Иродов. Задачи по общей физике. Учебное пособие для вузов. Москва: Лань. 2009. 420 с.
12. Н.И.Калитеевский. Волновая оптика. Учебное пособие. 5-е издание, стереотипное. СПб: Лань. 2008. 480 с.
13. Г.С.Ландсберг. Оптика. Учебное пособие. 6-издание, стереотипное. Москва. Физматлит. 2003. 848 с.
14. И.В.Савельев. Курс общей физики. Учебник. В 3-х томах. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. СПб.: Лань. 2011. 496 с.
15. А.Г.Чертов. Задачник по физике. 8-е издание, переработанное и дополненное. Москва: Физматлит. 2009. 640 с.
16. Борн, М. Основы оптики. Москва. Издательство "Наука". 1973. 993 с.
17. Е.И.Бутиков. Оптика. Учебное пособие. Издание третье, дополненное. Лань. Санкт-Петербург, Москва, Краснодар. 2013. 608 с.
18. Ландсберг Г. С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. — 6-е изд., стереот. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 848 с.
19. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. Т. IV. Оптика. — 3-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 792 с.
20. А.Н.Матвеев. Оптика. Издательство "Высшая школа". Москва. 1985. 351 с.
21. Физический практикум. Электричество и оптика. Под редакцией проф. В.И.Ивероновой. Издательство "Наука". Москва. 1968. 815 с.
22. И.М.Нагибина. Интерференция и дифракция света. Издание второе, переработанное и дополненное. Ленинград. Издательство "Машиностроение". 1985. 332 с.
23. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник. Под редакцией члена-корр. АН СССР А.Е.Шейндлина. Издательство "Энергия". Москва. 1974. 472 с.
24. Encyclopedia of modern optics. Vol. 1-5. Editor in sheff Robert D. Guenter. Editors Duncan G.Stell, Leopold Bayvel. 2005.

25. С.К.Стафеев, К.К.Боярский, Г.Л.Башнина. Основы оптики. Учебное пособие. СПб. Питер. 2006. 336 с.
26. С.А.Ахманов, С.Ю.Никитин. Физическая оптика. 2-е издание. Издательство Московского университета. Издательство "Наука". Москва. 2004. 656 с.
27. П.С.Кудрявцев. История физики. Том I. От древности до Менделеева. Государственное учебно-педагогическое издательство Министерства Просвещения СССР. Москва. 1956. 563 с.
28. П.С.Кудрявцев. История физики. Том II. От Менделеева до открытия квант. Государственное учебно-педагогическое издательство Министерства Просвещения СССР. Москва. 1956. 487 с.
29. П.С.Кудрявцев. История физики. Том II. От открытия квант до создания квантовой механики. Издательство "Просвещение". Москва. 1971. 424 с.
30. Б.И.Спасский. История физики. Часть I. Издательство "Высшая школа". Москва. 1977. 320 с.
31. Б.И.Спасский. История физики. Часть I. Издательство "Высшая школа". Москва. 1977. 303 с.
32. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики: С древнейших времен до конца XVIII века. Издание второе, стереотипное. Издательство КомКнига. Москва. 2007. 352 с.
33. Я.Г.Дорфман. Всемирная история физики с начала XIX до середины XX века. Издательство "Наука". Москва. 1979. 317 с.
34. B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger". Physical Review Letters. 116(6).
35. Abbott, B. P.; et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) (15 June 2016). "GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence". Physical Review Letters. 116 (24).

36. А.А.Майкельсон. "Jaqtılılıq tolqınları hám olardıń qollanılıwı" ("Световые волны и их применения"). Пер. с англ. В. О. Хвольсон; Под ред. и с доп. проф. О.Д.Хвольсона. Книгоиздательство Матезисъ. 1912. 2-е изд., испр. и доп. - Москва; Ленинград: Гос. техн.-теоретич. изд-во, 1934 (Л. : тип. им. Бухарина). - Обл., 143 с.

37. Таблицы физических величин. Справочник по редакцией академика И.К.Кикоина. Москва. Атомиздат. 1976. 1008 с. (114-125 бетлер).

38. С.И.Новикова. Тепловое расширение твердых тел. Издательство "Наука". Москва. 294 с.